

ISSN 1818-0442

DOI: 10.21293/1818-0442

Доклады ТУСУРа. 2017 • Том 20, № 4

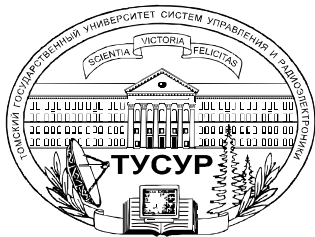
ДОКЛАДЫ

Томского государственного университета
систем управления и радиоэлектроники

2017 • Том 20, № 4



9 771818 044708 02007



Министерство образования и науки Российской Федерации

ДОКЛАДЫ ТОМСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

Том 20, № 4, 2017

Периодический научный журнал

Выходит 4 раза в год

Основан в 1997 г.

ISSN 1818-0442

DOI: 10.21293/1818-0442

Гл. редактор:

А.А. Шелупанов, д.т.н., проф.

Зам. гл. редактора:

Р.В. Мещеряков, д.т.н., проф.

Редакционная коллегия:

М.П. Батура, д.т.н., проф. (Минск)

Б.А. Беляев, д.т.н., проф.

(Красноярск)

Ян Браун (Brown Ian), PhD (США)

С.А. Гаврилов, д.т.н., проф. (Москва)

Ю.П. Ехлаков, д.т.н., проф.

В.М. Исаев, д.т.н. (Мытищи)

А.В. Кобзев, д.т.н., проф.

А.М. Кориков, д.т.н., проф.

Ю.Н. Кульчин, академик РАН

(Владивосток)

В.Ш. Меликян, чл.-корр. НАН

Республики Армения (Ереван)

Е.М. Окс, д.т.н., проф.

И.Н. Пустынский, д.т.н., проф.

В.К. Сарьян, академик НАН

Республики Армения (Москва)

А.Р. Сафин, к.т.н., доц. (Москва)

П.Е. Троян, д.т.н., проф.

В.В. Шайдуков, чл.-корр. РАН

(Красноярск)

С.М. Шандаров, д.ф.-м.н., проф.

Г.С. Шарьгин, д.т.н., проф.

Ю.А. Шурыгин, д.т.н., проф.

Ответственный секретарь:

В.Н. Масленников, к.т.н., доцент

Адрес редакции:

634050, г. Томск,
пр. Ленина, 40, ТУСУР,
тел. (382-2) 51-22-43

Свидетельство
о регистрации МНС РФ
1027000867068
от 13 октября 2004 г.

Подписной индекс 20648
в каталоге Агентства
«Роспечать»: газеты и журналы

Издательство

Томского государственного
университета систем управления
и радиоэлектроники
634050, Томск, пр. Ленина, 40,
тел. (382-2) 51-21-21

Оригинал-макет выпуска подготовлен
и отпечатан тираж ИП В.М. Бочкаревой
Техн. редактор В.М. Бочкарева
Корректор В.Г. Лихачева

Подписано в печать 25.12.2017.

Формат 60×84 1/8.

Усл. печ. л. 10

Тираж 500. Заказ 40.

Содержание

ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА, РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

Хлусов В.А., Доценко В.В. Коэффициент шума активной антенной решетки.....	7
Денисов В.П., Дубинин Д.В., Ерофеев Д.В. Вопросы разрешающей способности фазовых радиопеленгаторов с антенными системами в виде линейных решеток	11
Запасной А.С., Беличенко В.П., Мироньчев А.С. Исследование возможностей применения макета ближнеполюсного интерференционного микроволнового микроскопа для задач гигроскопии и дефектоскопии.....	17
Доманов С.К., Гошин Г.Г. Исследование влияния увеличения шага ближнеполюсового сканирования на точность восстановления диаграммы направленности бортовой антенны космического аппарата	20
Еханин С.Г., Томашевич А.А. Исследование роли термопластических явлений в механизме деградации полупроводниковых гетероструктур на основе GaN	23
Климов А.С., Останин С.А. Распределение концентрации плазмы в разряде с протяженным полым катодом форвакуумного плазменного источника электронного пучка	26
Тренкаль Е.И., Лоцилов А.Г. Макет измерительного зонда нового типа для измерения уровней многослойных сред (<i>на англ. яз.</i>)	30
Гейко П.П., Смирнов С.С. Анализ содержания оксидов галогенов в атмосфере методом дифференциальной оптической спектроскопии в УФ-области спектра	33
Салыкова Д.А., Утемисов А.Н., Капустин В.В. Повышение качества изображений активно-импульсных телевизионно-вычислительных систем с использованием алгоритмов инверсной фильтрации	39
Бусурич В.И., Коробков В.В., Йин Нанг Вин Исследование влияния параметров кольцевого резонатора на характеристики трёхосевого оптоэлектронного преобразователя угловой скорости	43
Филатов А.В., Белов Н.Ю., Тарасов С.Е., Филатов Н.А., Лоцилов А.Г. Две модели измерителя модуля коэффициента отражения в широкой полосе частот методами микроволновой радиометрии.....	50
Рыжов В.А., Смуров А.В. Использование условий инвариантности схемных функций для синтеза активных цепей	55

УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА

Васильев В.И., Вульфин А.М., Кудрявцева Р.Т. Анализ и управление рисками информационной безопасности с использованием технологии когнитивного моделирования.....	61
---	----

Бордак И.В., Росенко А.П. Разработка метода количественной оценки и прогнозирования безопасности информации ограниченного доступа на основе Марковских случайных процессов	67
Мельман В.С., Шабли Ю.В., Кручинин Д.В., Кручинин В.В. Сравнительный анализ вычислительных способов нахождения коэффициентов ряда Тейлора в математических пакетах	71
Мещеряков Р.В., Жуковский О.И., Сенченко П.В., Гриценко Ю.Б., Милихин М.М. Особенности архитектуры единого информационного пространства при управлении сложными технологическими процессами	75
Милихин М.М., Гриценко Ю.Б., Шурыгин Ю.А. Методика организации процесса мониторинга торговых и промышленных объектов с использованием геоинформационных технологий	82
Саломатина Е.В. Топологическая модель информационно-управленческой сети	87
Боровской И.Г., Шельмина Е.А. Сравнительный анализ настольных и клиент-серверных СУБД	92
Емельянова Т.А., Гончаров В.И., Дементьев Ю.Н., Тутов И.А. Синтез двухконтурной системы управления химическим реактором численным методом с привлечением регуляризации	95
Воевода А.А., Бобобеков К.М. Активная идентификация параметров ПИ-регулятора в системе автоматического управления неустойчивым объектом первого порядка	100
Катаев М.Ю., Бекеров А.А. Методика обнаружения водных объектов по многоспектральным спутниковым измерениям	105
Катаев М.Ю., Катаева Н.Г., Коробко А.П., Шаймарданов Т.М. Методика построения фронтальной скелетной модели фигуры человека по изображениям	109
Горитов А.Н., Молокова М.Ф. Расчёт динамических характеристик манипулятора	113
Горитов А.Н. Построение трехмерной модели рабочего пространства промышленного робота	117
Кочергин М.И. Интерпретация диаграмм состояний в язык многоуровневого моделирования (<i>на англ. яз.</i>)	122
Мельников А.К. Сложность расчета точных распределений вероятности симметричных аддитивно разделяемых статистик и область применения предельных распределений	126
Зыков Д.Д., Уразаев Д.Р., Хабибулина Н.Ю. Обзор комплексных решений в сфере учета ресурсов	131
Хатьков Н.Д., Мандель А.Е. Практический опыт использования мультимедийной системы дистанционного обучения Sydney для коллективной формы обучения	134
Буймов А.Г. Закономерности поведения кривых забывания	138
Новохрестова Д.И. Временная нормализация слогов алгоритмом динамической трансформации временной шкалы при оценке качества произнесения слогов в процессе речевой реабилитации	142

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Корольский Д.А., Михальченко Г.Я., Михальченко С.Г. Формирование постоянного тока в источниках питания светодиодных светильников повышенной надежности	149
---	-----

СООБЩЕНИЯ

Акифьев А.А., Зайцева Е.В., Замякин С.С., Максимов А.Е., Пустынский И.Н. Исследование и проектирование сглаживающих фильтров в среде Scilab для подавления шумов в изображениях	157
Требования	161

 Contents

ELECTRONICS, MEASUREMENT TECHNOLOGY, RADIO ENGINEERING AND COMMUNICATIONS

Khlusov V.A., Dotcenko V.V. Noise figure of an active antenna array	7
Denisov V.P., Dubinin D.V., Erofeev D.V. Questions of resolving ability of phase direction finder with antenna system in the form of line latitude	11
Zapasnoy A.S., Belichenko V.P., Mironchev A.S. Research of possibilities of application model of near-field microwave interference microscope for problems of hygroscopy and defectoscopy	17
Domanov S.K., Goshin G.G. Investigation of influence of near-field scan step size increment on antenna pattern reconstruction accuracy of a satellite onboard antenna	20
Ekhanin S.G., Tomashevich A.A. Investigation of degradation of GaN based semiconductor structures.....	23
Klimov A.S., Ostanin S.A. Plasma density distribution in the discharge with an extended hollow cathode of the fore-vacuum plasma electron source.....	26
Trenkal E.I., Loshchilov A.G. A breadboard model of the measuring probe of a new type for the measurement of multiphase environments levels	30
Geiko P.P., Smirnov S.S. Atmosphere halogen oxides concentration retrieving by differential optical spectroscopy in the UV-region of the spectrum	33
Salykova D.A., Utemissov A.N., Kapustin V.V. The improvement in image quality active pulse TV systems using inverse filtering algorithms.....	39
Busurin V.I., Korobkov V.V., Yin Naing Win Investigation of influence of the ring resonator parameters on the characteristics of the three-axis photoelectric angular velocity transducer	43
Filatov A.V., Belov N.Ju., Tarasov S.E., Filatov N.A., Loshchilov A.G. Two models of the reflection coefficient modulus meter in a wide frequency band using microwave radiometry	50
Rizhov V.A., Smurov A.V. Conditions of functions invariance for the synthesis of active circuits.....	55

MANAGEMENT, COMPUTER SCIENCE AND INFORMATICS

Vasilyev V.J., Vulfin A.M., Kudryavtseva R.T. Analysis and management of information security risks with use of cognitive modeling technology	61
Bordak I.V., Rosenko A.P. Development of a method for quantitative evaluation and prediction of information security with restricted access on the basis of Markov random	67
Melman V.S., Shablya Y.V., Kruchinin D.V., Kruchinin V.V. Comparative analysis of computational methods for finding Taylor series coefficients in computer algebra systems	71
Meshcheryakov R.V., Zhukovskiy O.I., Senchenko P.V., Gritsenko Yu.B., Milikhin M.M. Features of the architecture of a common information space for managing complex technological processes.....	75
Milikhin M.M., Gritsenko Yu.B., Shurygin Yu.A. Methodology for organizing the monitoring of commercial and industrial facilities using geoinformation technologies	82
Salomatina E.V. Topological model of information control networking.....	87
Borovskoy I.G., Shelmina E.A. Comparative analysis of desktop and client-server databases	92
Emelyanova T.A., Goncharov V.I., Dement'ev Y.N., Tutov I.A. Synthesis of a two-loop control system for a chemical reactor using a numerical method with regularization	95
Voevoda A.A., Bobobekov K.M. Active identification of PI-regulator parameters in the automatic control system of an unstable object first-order.....	100
Kataev M.Yu., Bekerov A.A. Methodology of the water objects detection from multi-spectrum satellite measurements	105
Kataev M.Yu., Kataeva N.G., Korobko A.P., Shaymardanov T.M. Methodology to build a frontal skeletal model of a human figure during walking using images.....	109
Goritov A.N., Molokova M.F. Calculation of the dynamic characteristics of the manipulator.....	113
Goritov A.N. Building a three-dimensional model of the workspace of an industrial robot	117

Kochergin M.I.	
Interpretation of the statechart diagram into a multilevel simulation language.....	122
Melnikov A.K.	
Processing complexity for exact probability distributions of symmetrical additively partitioned statistics and application area of limit distributions	126
Zykov D.D., Urazayev D.R., Khabibulina N.Yu.	
Overview of complete point solution in the resources accounting sphere.....	131
Khatkov N.D., Mandel A.E.	
Practical experience of using multimedia distance learning system Sydney for the collective form of learning	134
Buymov A.G.	
Regularities in the behavior of the forgetting curves.....	138
Novokhrestova D.I.	
Time normalization of syllables with the dynamic time warping algorithm in assessing of syllables pronunciation quality in the process of speech.....	142

ELECTRICAL ENGINEERING

Korolsky D.A., Mikchalchenko G.Ya., Mikchalchenko S.G.	
Direct load current shaping of LED driver with increased reliability.....	149

MESSAGES

Akifyev A.A., Zaytseva E.V., Zamyakin S.S., Maximov A.E., Pustynsky I.N.	
Realization of the smoothing filters for noise suppression in the Scilab environment.....	157
Manuscript requirements	161

**ЭЛЕКТРОНИКА,
ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА,
РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ**

УДК 520.628

В.А. Хлусов, В.В. Доценко

Коэффициент шума активной антенной решетки

Анализируются шумовые свойства активной антенной решетки (АР) с произвольным распределением поля по раскрыву. Определен коэффициент шума активной АР, рассчитанный относительно АР с равномерным синфазным распределением амплитуды поля по раскрыву и выраженный через широко распространенные характеристики антенной техники. Показан количественный выигрыш в коэффициенте шума активной АР относительно пассивной АР (при идентичных направленных свойствах).

Ключевые слова: антенная решетка, коэффициент шума, синфазное распределение амплитуды поля, раскрыв антенны, диаграмма направленности.

doi: 10.21293/1818-0442-2017-20-4-7-10

Основное отличие активных приемных антенных решеток (АР) от пассивных заключается в том, что амплитудное распределение поля по раскрыву активной АР производится после предварительного усиления выходных сигналов антенных элементов АР. При этом взвешиваются как полезный сигнал, так и тепловой шум, приведенный ко входу каждого из малошумящих усилителей (МШУ).

Несмотря на большое количество работ, посвященных теоретическому анализу шумовых свойств АР, представляется интересным провести сравнительный анализ коэффициента шума активной и пассивной АР и получить количественные результаты такого анализа, выраженные через широко распространенные характеристики антенн.

Результаты такого анализа представляют самостоятельный практический интерес для инженеров, поскольку в явном виде позволят разработчикам АР учесть их основные особенности.

В [1] приведены результаты анализа величины отношения сигнал/шум на выходах пассивной и активной АР с пространственным суммированием выходных сигналов. Показана зависимость количественного выигрыша в шумовых свойствах активной АР от параметров диаграммы направленности (ДН) приемного «суммирующего» рупора. В [2–5] приводятся методики расчета коэффициента шума активной решетки с неравномерным распределением взвешивающих коэффициентов. Во всех упомянутых работах содержатся все фундаментальные сведения о шумовых свойствах АФАР, но не акцентируются практическая значимость полученных результатов анализа. Такой акцент, на взгляд авторов данной работы, был бы очень полезен для разработчиков радиотехнических систем, использующих узконаправленные антенны с низким уровнем боковых лепестков диаграммы направленности.

В настоящей работе на примере анализа N -элементной линейной АР, в которой распределение поля по раскрыву задано коэффициентами a_i , определяющими коэффициенты передачи сигнала (по амплитуде) от i -го антенного элемента в суммирующее устройство, при этом $0 < a_i \leq 1$, получены выражения для количественной оценки коэффициента шума активной и пассивной АР.

Отметим, что коэффициенты a_i , формирующие дискретный синфазный раскрыв АР, есть отсчеты $a_i = g(x_i)$ непрерывной функции $g(x)$, определяющей в аналитической форме вид распределения амплитуды поля по раскрыву АР единичной длины. Функция $g(x)$ нормирована к ее максимуму на интервале определения $x \in (-1/2; 1/2)$. Площадь под кривой, заданной функцией $g(x)$, всегда меньше

единицы, и величина $A = \int_{-1/2}^{1/2} g(x) dx$ определяет по-

тери коэффициента усиления антенны [1] при отличии распределения поля по раскрыву от равномерного, для которого $g(x)=1$ и, следовательно, $A = 1$. Очевидно, что

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_i = \int_{-1/2}^{1/2} g(x) dx = A \leq 1; \quad (1)$$

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_i^2 = \int_{-1/2}^{1/2} g^2(x) dx = C \leq 1,$$

где величина C получила название «полная излучаемая (принимаемая) мощность» [6].

Для N -элементной пассивной АР (рис. 1), в которой отсутствуют потери при передаче сигнала от антенных элементов на выход антенны и коэффициенты a_i равны единице (равномерное синфазное распределение амплитуды поля по раскрыву АР), выражение для величины γ_0 (отношения «принимаемый сигнал/шум») на ее выходе имеет вид

$$\gamma_0 = \frac{P_i N}{P_{\text{ш}}^{\Phi} + P_{\text{ш}}^{\text{МШУ}}} = \frac{P_0}{P_{\text{ш}}}, \quad (2)$$

где P_0 – полная мощность плоской электромагнитной волны (принимаемого сигнала), падающей на раскрыв АР, волновой вектор которой перпендикулярен плоскости раскрыва; P_i – мощность электромагнитной волны, принимаемой отдельным антенным элементом; $P_{\text{ш}}^{\text{МШУ}}$ – мощность тепловых шумов МШУ, усиливающего выходной сигнал пассивной АР, приведенная к его входу, $P_{\text{ш}}^{\Phi}$ – мощность тепловых шумов в пассивной линии (фидере) передачи

сигналов антенных элементов, $P_{\text{ш}} = P_{\text{ш}}^{\Phi} + P_{\text{ш}}^{\text{МШУ}}$ – полная мощность шумов на входе МШУ.

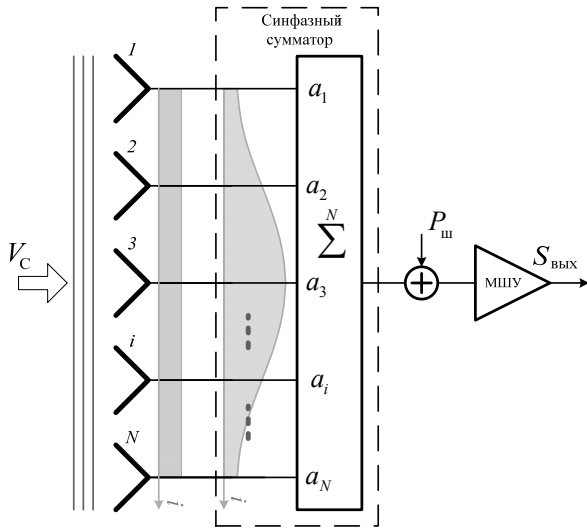


Рис. 1. Пассивная антенная решетка

Необходимо отметить, что для упрощения анализа мы считаем, что как входы пассивного сумматора, так и его выход имеют одинаковый активный импеданс (например, 50 Ом), величина которого и определяет мощность тепловых шумов $P_{\text{ш}}^{\Phi}$. Собственный шум пассивного сумматора на его выходе не зависит от величины коэффициентов a_i .

Выражение (2) определяет максимально возможное значение величины отношения сигнал/шум на выходе АР. Для всех других соотношений коэффициентов, когда $a_i \neq 1$, отношение сигнал/шум будет хуже. Отметим также, что для $a_i = 1$ (равномерное распределение) ДН АР имеет максимально узкий главный лепесток и, следовательно, максимальный коэффициент усиления.

В общем случае при произвольных значениях a_i величина отношения сигнал/шум на выходе пассивной АР (см. рис. 1) определяется выражением

$$\gamma_{\text{ПА}} = \frac{P_i \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N a_i \right)^2}{P_{\text{ш}}} \Rightarrow \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{P_i \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N a_i \right)^2}{P_{\text{ш}}} = \frac{P_i N A^2}{P_{\text{ш}}} = \frac{P_0 A^2}{P_{\text{ш}}} = \gamma_0 A^2, \quad (3)$$

где $P_i \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N a_i \right)^2 = P_c$ – мощность сигнала на выходе синфазного сумматора (синфазное «весовое» суммирование N взаимно когерентных сигналов с выходов антенных элементов [1]).

Нетрудно убедиться, что для $a_i = 1$ выражение (3) идентично выражению (2), величина $\gamma_{\text{ПА}} = \gamma_0$ и при любых a_i справедливо неравенство $\gamma_{\text{ПА}} \leq \gamma_0$.

Отношение величин γ_0 и $\gamma_{\text{ПА}}$ определяет коэффициент шума $K_{\text{ш}}^{\text{П}}$ пассивной АР с произвольным распределением коэффициентов a_i относительно

антенны с равномерным ($a_i=1$) распределением этих коэффициентов. Учитывая выражение (1), можем записать соотношение

$$K_{\text{ш}}^{\text{П}} = \frac{\gamma_0}{\gamma_{\text{ПА}}} = \frac{N^2}{\left(\sum_{i=1}^N a_i \right)^2} \rightarrow \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{N^2}{\left(\sum_{i=1}^N a_i \right)^2} = A^{-2}, \quad (4)$$

где A – величина потерь усиления антенны (по амплитуде) [6]. Таким образом, коэффициент шума (4) определяет величину потерь усиления пассивной АР при изменении ее ДН относительно ДН АР с равномерным распределением коэффициентов a_i .

Активная АР

Для активной АР (рис. 2) выходные сигналы антенных элементов предварительно усиливаются в канале МШУ с коэффициентом усиления (по мощности) $K_{\text{МШУ}}$. Выражение для величины отношения сигнал/шум $\gamma_{\text{АА}}$ на выходе сумматора активной АР имеет вид

$$\gamma_{\text{АА}} = \frac{P_c}{P_{\text{ш}}^{\Sigma}} = \frac{P_i K_{\text{МШУ}} \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N a_i \right)^2}{K_{\text{МШУ}} P_{\text{ш}} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_i^2 + P_{\text{ш}}^{\Phi}} = \frac{P_i \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N a_i \right)^2}{P_{\text{ш}}^{\text{МШУ}} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_i^2 + P_{\text{ш}}^{\Phi} \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_i^2 + K_{\text{МШУ}}^{-1} \right)}, \quad (5)$$

где $P_c = P_i K_{\text{МШУ}} \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N a_i \right)^2$ – мощность принятого и усиленного сигнала на выходе сумматора активной АР; $P_{\text{ш}}^{\Sigma} = K_{\text{МШУ}} P_{\text{ш}} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_i^2 + P_{\text{ш}}^{\Phi}$ – мощность шумов на выходе сумматора, обусловленная совокупностью $\left(K_{\text{МШУ}} P_{\text{ш}} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_i^2 \right)$ взаимно некоррелированных

выходных шумов МШУ и тепловым шумом $P_{\text{ш}}^{\Phi}$ выходного фидера пассивного сумматора.

Как было отмечено выше, шум выходного фидера пассивного сумматора не зависит от значений коэффициентов a_i и всегда присутствует на его выходе. При выборе достаточно большого коэффициента усиления МШУ влиянием шума выходного фидера пассивного сумматора можно пренебречь, поскольку выходной шум будет определяться только выходными шумами МШУ. При выполнении неравенства $K_{\text{МШУ}}^{-1} \ll \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_i^2$, откуда следует

$$K_{\text{МШУ}} \gg \frac{N}{\sum_{i=1}^N a_i^2} \approx C^{-1}, \quad (6)$$

выражение (5) упрощается и принимает вид

$$\gamma_{AA} = \frac{P_c}{P_{ш}^{\Sigma}} = \frac{P_i \left(\sum_{i=1}^N a_i \right)^2}{P_{ш} \sum_{i=1}^N a_i^2} \Rightarrow \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{P_i \left(\sum_{i=1}^N a_i \right)^2}{P_{ш} \sum_{i=1}^N a_i^2} = \frac{P_0 A^2}{P_{ш} C} = \gamma_0 \frac{A^2}{C}. \quad (7)$$

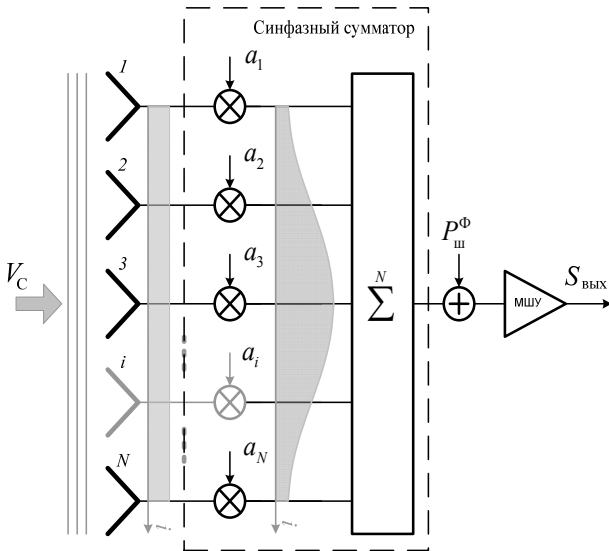


Рис. 2. Активная антенная решетка

Отметим, что выражение (7) идентично выражению (3) в [4], определяющее величину соотношения сигнал/шум на выходе активной АР, что подтверждает корректность формулы (7).

Для случая $a_i = 1$ (равномерное распределение значений a_i , для которых $A = C = 1$) имеет место равенство

$$\gamma_{AA} \Big|_{a_i=1} = \frac{P_i N^2}{P_{ш} N} = \frac{P_i N}{P_{ш}} = \gamma_0,$$

и активная АР по шумовым свойствам эквивалентна пассивной АР с равномерным распределением поля по раскрытию.

В общем случае для произвольных значений a_i коэффициент шума активной АР равен

$$K_{ш}^A = \frac{\gamma_0}{\gamma_{AA}} = \frac{N \sum_{i=1}^N a_i^2}{\left(\sum_{i=1}^N a_i \right)^2} \Rightarrow \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{N \sum_{i=1}^N a_i^2}{\left(\sum_{i=1}^N a_i \right)^2} = \frac{C}{A^2} \quad (8)$$

и, сравнивая коэффициент шума (4) пассивной АР и коэффициент шума (8) активной АР (учитывая, что $C \leq 1$), можно записать неравенство

$$\frac{C}{A^2} \approx \frac{N \sum_{i=1}^N a_i^2}{\left(\sum_{i=1}^N a_i \right)^2} = K_{ш}^A \leq K_{ш}^{\Pi} = \frac{N^2}{\left(\sum_{i=1}^N a_i \right)^2} \approx \frac{1}{A^2}, \quad (9)$$

из которого следует, что коэффициент шума активной АР, в которой взвешивание сигналов от отдельных антенных элементов производится после их усиления, всегда меньше коэффициента шума пас-

сивной АР с такой же ДН и сравнивается с ним только в предельном случае равномерного распределения взвешивающих коэффициентов a_i .

Из выражения (9) также следует, что выигрыш в коэффициенте шума активной АР по сравнению с пассивной АР составляет величину

$$\delta = \frac{K_{ш}^{\Pi}}{K_{ш}^A} = \frac{N^2 \left(\sum_{i=1}^N a_i \right)^2}{\left(\sum_{i=1}^N a_i \right)^2 N \sum_{i=1}^N a_i^2} = \frac{1}{N \sum_{i=1}^N a_i^2} \Rightarrow \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N \sum_{i=1}^N a_i^2} = \frac{1}{C}. \quad (10)$$

Предельный переход к непрерывному раскрытию АР в выражениях (3), (4), (7), (8), (10) позволяет производить расчет нужных величин непосредственно по известным для ряда распределений значениям величин A и C [6], не производя предварительный расчет коэффициентов a_i .

Выигрыш в шумовых свойствах активной АР тем больше, чем сильнее отличие распределения коэффициентов a_i от равномерного. Например, для 33-элементной ($N = 33$) пассивной АР, когда распределение $g(x)$ задано широко применяемой в антеннах активной радиолокации функцией «cos на пьедестале», имеющей вид

$$g(x) = k + (1-k) \cos \pi x \Big|_{k=0,2} = 0,2 + 0,8 \cos \pi x, \quad (11)$$

(уровень первого бокового лепестка (УБЛ) ДН равен ~ -22 дБ, а остальных ниже -30 дБ), коэффициенты a_i определены выражением $a_i = g(x = x_i)$, где

$$x_i = \pi \frac{(N+1) - 2i}{2(N-1)}, \quad i = 1, 2, \dots, 33;$$

$$a_i = g(x = x_i) = (0,2; 0,278; \dots; 0,996; 1; 0,996; \dots; 0,278; 0,2).$$

Коэффициент шума $K_{ш}^{\Pi}$ [см. выражение (4)] такой АР равен

$$K_{ш}^{\Pi} = 10 \log \left(\frac{33^2}{(1 + 2(0,2 + 0,278 + \dots + 0,996))^2} \right) = 10 \log 2,08 = 3,18 \text{ дБ}. \quad (12)$$

Для 33-элементной активной АР с таким же распределением $g(x)$ коэффициент шума $K_{ш}^A$ (8) равен

$$K_{ш}^A = 10 \log \left(\frac{33 \cdot (1 + 2(0,2^2 + 0,278^2 + \dots + 0,996^2))}{(1 + 2(0,2 + 0,278 + \dots + 0,996))^2} \right) = 10 \log 1,14 = 0,56 \text{ дБ}.$$

Выигрыш в коэффициенте шума составляет величину $\delta = \frac{K_{ш}^{\Pi}}{K_{ш}^A} = 1,82$ (2,6 дБ). Таким образом, ко-

эффициент шума активной АР на 2,6 дБ меньше, чем у пассивной АР [см. выражение (12)], что очень существенно, особенно для активной радиолокации, где энергетический потенциал РЛС во многом определяет ее стоимость. Данный выигрыш физически

обусловлен снижением теплового шума приемной активной антенны (по сравнению с пассивной) за счет взвешивания тепловых шумов выходных фидеров антенных элементов (АЭ), поскольку предварительно выходные сигналы АЭ усиливаются и только потом взвешиваются (для обеспечения необходимого УБЛ).

Приведенные результаты согласуются с известными данными теории и практики антенн [1–6] и получены с использованием основных положений СВЧ-радиотехники.

Заключение

Результаты проведенного анализа шумовых свойств активных и пассивных линейных АР позволяют сделать вывод о чрезвычайной привлекательности использования активных АР в однопозиционных РЛС с твердотельными формирователями излученного сигнала. Полученный выигрыш в 2,6 дБ для конкретного варианта АР на практике может быть и большим, поскольку потери в подводящих фидерах пассивной антенны, как правило, больше соответствующих потерь в активных АР, так как в активных АР маломощные усилители сигналов размещены в непосредственной близости от антенных элементов и потери на передачу и прием сигналов минимальны. Дополнительный выигрыш в энергетическом потенциале может составлять до 1,5 дБ, а суммарный выигрыш – до 4 дБ, что в 2,5 раза снижает требование к мощности излучаемого сигнала (при прочих равных условиях) и, следовательно, качественно снижает затраты на реализацию твердотельных генераторов сигнала излучения РЛС.

Приведенные результаты сравнительного анализа шумовых свойств активных и пассивных линейных АР справедливы и для двумерных АР, в том числе и конформных. Это утверждение следует из того факта, что, как и в одномерных (линейных) активных АР, в двумерных активных АР при выполнении условия (6) производится взвешивание тепловых шумов питающих линий антенных элементов, что и обуславливает снижение коэффициента шума активной двумерной решетки. При этом для выполнения условия (6) в общем случае необходим больший коэффициент усиления МШУ, поскольку число элементов N_2 двумерной АР при ширине телесного угла ДН, равной ширине ДН линейной АР, гораздо больше числа элементов N_1 линейной АР ($N_2 \approx N_1^2$, для квадратного раскрыва двумерной АР).

Литература

1. Активные фазированные антенные решетки / под ред. Д.И. Воскресенского, А.И. Канашенкова. – М.: Радиотехника, 2004, 488 с.
2. Gatti R.V. Computation of Gain, Noise Figure, and Third-Order Intercept of Active Array Antennas / R.V. Gatti, M. Dionigi, R. Sorrentino // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2004. – Vol. 52, No. 11. – P. 3139–3143.
3. Holzman E.L. A comparison of active phased array, corporate beamforming architectures / E.L. Holzman, A.K. Agrawal // Proc. IEEE Int. Symp. Phased Array Systems and Technology, Oct. 15–18, 1996. – P. 429–434.
4. Lee J.J. G/T and noise figure of active array antennas // IEEE Trans. Antennas Propagat. – 1993. – Vol. 41. – P. 241–244.
5. Holzman E.L. Intercept points of active phased array antennas // Proc. IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. – 1996. – P. 999–1002.
6. Бартон Д. Справочник по радиолокационным измерениям / Д. Бартон, Г. Вард; пер. с англ. под ред. М.М. Вейсбейна. – М.: Сов. радио, 1976. – 392 с.

Хлусов Валерий Александрович

Д-р техн. наук, вед. научный сотрудник
НИИ радиотехнических систем ТУСУРА,
вед. специалист АО «НПФ «МИКРАН»
Тел.: 8-(382-2) 41-35-62
Эл. почта: hva@micran.ru

Доценко Владимир Викторович

Ген. директор АО «НПФ «МИКРАН»
Тел.: +7 (382-2) 41-34-03
Эл. почта: dvv@micran.ru

Khlusov V.A., Dotcenko V.V.

Noise figure of an active antenna array

The article considers the noise characteristics of an active antenna array (AA) with an arbitrary aperture field distribution. The noise figure of an active AA was defined, calculated relating to an antenna array with a random in-phase aperture amplitude distribution, and expressed in terms of common characteristics for antenna engineering. Quantitative benefits of the noise figure of the active AA in respect to the passive AA (in case of the identical directional response) are demonstrated.

Keywords: antenna array, noise figure, in-phase aperture amplitude distribution, aperture, antenna pattern.

УДК 621.396.41

В.П. Денисов, Д.В. Дубинин, Д.В. Ерофеев

Вопросы разрешающей способности фазовых радиопеленгаторов с антенными системами в виде линейных решеток

Рассматриваются фазовые пеленгаторы с антенными системами в виде линейных решеток. Показано, что такие пеленгаторы при соответствующем построении обладают угловой разрешающей способностью. Выявляются причины подавления слабого сигнала сильным в подобных системах. Полученные закономерности иллюстрируются на примере пеленгатора с обработкой сигналов методом «суммирования косинусов».

Ключевые слова: разрешающая способность, фазовые радиопеленгаторы.

doi: 10.21293/1818-0442-2017-20-4-11-16

Моноимпульсные фазовые радиопеленгаторы с антенными системами в виде решеток слабонаправленных элементов нашли широкое применение в системах радиотехнической разведки и радиомониторинга [1, 2]. Причиной этого служит то, что они являются беспойсковыми по углу, т.е. способны по одному излученному сигналу запеленговать источник радиоизлучения (ИРИ), находящийся в зоне обзора.

Недостатком фазовых радиопеленгаторов, построенных по известным схемам, является отсутствие угловой разрешающей способности, что проявляется в невозможности пеленгования источников радиоизлучения, сигналы которых одновременно попадают в полосу пропускания приемников. Очевидно, придание фазовым радиопеленгаторам такой возможности – актуальная научно-техническая задача.

Цель данной статьи – показать, что в совокупности разностей фаз, измеряемых в фазовых радиопеленгаторах, заложена информация о наличии и угловом положении двух источников радиоизлучения в зоне обзора и что при соответствующем построении пеленгатора возможность углового разрешения может быть реализована.

Цель достигается путем математического анализа фазовых соотношений сигналов на антенной системе пеленгатора при ее облучении двумя плоскими волнами с численными расчетами в среде MathCAD.

Простейший фазовый пеленгатор представляет собой разнесенные в пространстве антенны, приемные устройства, фазометр и вычислитель пеленга, соединенные между собой, как показано на рис. 1.

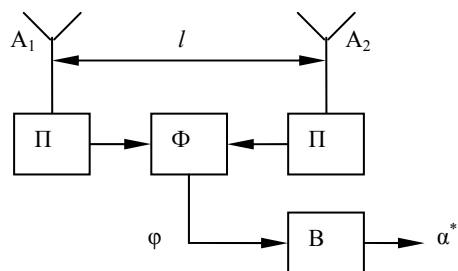


Рис. 1. Простейший фазовый радиопеленгатор:
A₁, A₂ – антенны, П – приемники, Ф – фазометр,
В – вычислитель

В переводной литературе такие пеленгаторы часто называют интерферометрами [3], хотя они являются таковыми только при определенном построении измерителя разности фаз, например, когда измерения выполняются с помощью измерительной линии.

Если на антенную систему пеленгатора, построенного по схеме рис. 1, падает одна плоская волна, то разность фаз φ сигналов на выходах антенн, угол прихода волны, отсчитываемый от нормали к антенной системе, α связаны известным соотношением

$$\Phi = \varphi + 2\pi k = 2\pi \frac{l}{\lambda} \sin \alpha, \quad (1)$$

где Φ – полная разность фаз; l – расстояние между фазовыми центрами антенн (фазометрическая база); λ – длина волны; k – число полных периодов разности фаз, утрачиваемых при фазовых измерениях.

Определение k называется устранением неоднозначности фазовых измерений и является отдельной задачей [4].

Формула (1) позволяет определить угол прихода волны (пеленг на источник излучения или переизлучения)

$$\alpha = \arcsin \frac{\lambda \cdot (\varphi + 2\pi k)}{2\pi l}. \quad (2)$$

Однако, если на антенную систему пеленгатора, построенного по схеме рис. 1, падают две или более волн, не различающихся ничем, кроме углов прихода, напряжения на выходах антенн A₁ и A₂ будут результатом их интерференции, и измеренная разность фаз не будет соответствовать пеленгу ни на один из излучателей. То есть пеленгаторы, построенные по схеме рис. 1, источники радиоизлучения (ИРИ) по углу не разрешают.

Практически пеленгаторы строятся по более сложной схеме, чем представленная на рис. 1. Устранение неоднозначности фазовых измерений приводит к необходимости иметь ряд фазометрических баз. Приемные антенны пеленгатора образуют решетку. Распределение фаз сигналов вдоль решетки зависит от количества принимаемых волн, их углов прихода и соотношений амплитуд. Совокупность разностей фаз сигналов на элементах решетки можно использовать для разрешения сигналов.

Для дальнейшего анализа примем, что слабонаправленные антенны пеленгатора образуют N -элементную решетку, а разности фаз φ_i измеряются относительно одной из них, как показано на рис. 2.

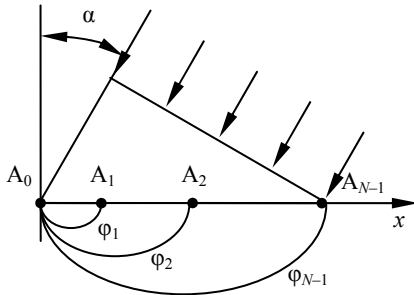


Рис. 2. Антенная система пеленгатора

Допустим, на данную антенную систему падают две плоские волны одинаковой частоты f_0 , одинаково поляризованные под углами α_1 и α_2 относительно нормали к ней. Сигналы в каждой точке x будут результатом интерференции этих волн. Будем иметь

$$u(t, x) = U(x) \cdot \cos[\omega_0 t - \psi(x)], \quad (3)$$

где

$$U(x) = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + 2U_1U_2 \cos[kx(v_1 - v_2) + \gamma_1 - \gamma_2]} \quad (4)$$

амплитуда результирующего сигнала,

$$\operatorname{tg} \psi(x) = \frac{U_1 \sin(kxv_1 + \gamma_1) + U_2 \sin(kxv_2 + \gamma_2)}{U_1 \cos(kxv_1 + \gamma_1) + U_2 \cos(kxv_2 + \gamma_2)}, \quad (5)$$

$\psi(x)$ – фаза результирующего сигнала; $U_1, U_2, \gamma_1, \gamma_2$ – амплитуды принимаемых сигналов и их начальные фазы в точке $x=0$; $v_1 = \sin \alpha_1, v_2 = \sin \alpha_2$. В случае когда $U_1 = U_2$,

$$U(x) = 2U_1 \left| \cos \left(\frac{\pi x}{\lambda} (v_1 - v_2) + \frac{\gamma_1 - \gamma_2}{2} \right) \right|, \quad (6)$$

$$\psi(x) = \pi \frac{x}{\lambda} (v_1 + v_2) + \frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2} + i\pi. \quad (7)$$

В последней формуле $i=0$, если выражение, стоящее под знаком модуля в (6), положительно, и $i=1$, если оно отрицательно. По формулам (5), (7) на рис. 3 построены кривые $\psi(x)$. Параметром семейства является отношение амплитуд падающих волн, $R = U_2/U_1$.

Из рис. 3 видно, что при $U_1 = U_2$ функция $\psi(x)$ имеет характер периодических непрерывных колебаний вокруг прямой

$$\psi_0(x) = \pi \frac{x}{\lambda} (v_1 + v_2).$$

Пространственный период колебаний равен

$$T_\psi = \frac{2\lambda}{\Delta v}, \quad \Delta v = v_1 - v_2.$$

В точках разрывов амплитуда суммарного сигнала равна нулю. Как видим, в данном случае $\psi(x)$

содержит точную информацию об угловом положении обеих целей.

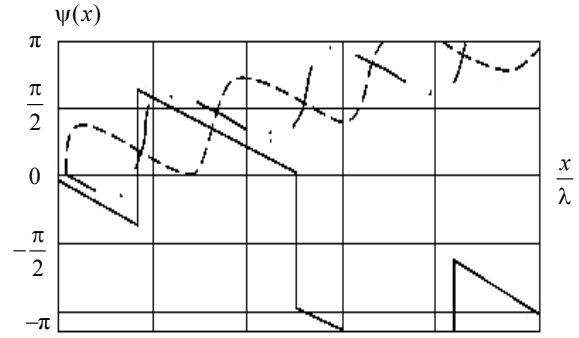


Рис. 3. Зависимость фазы результирующего сигнала от координаты антенной системы x :

- $R=0,8; \gamma_1 - \gamma_2 = \pi; v_1 = 0,05; v_2 = 0,25;$
- $R=1; \gamma_1 - \gamma_2 = 0; v_1 = 0,05; v_2 = 0,25;$
- · - · - $R=0,8; \gamma_1 - \gamma_2 = 0; v_1 = 0,05; v_2 = 0,25$

Наблюдая изменения фазы на пространственном интервале, большем, чем период T_ψ , можно определить величину периода, а следовательно, и угловой разнос источников сигналов $\Delta v = \frac{2\lambda}{T_\psi}$, а

также представить среднее значение зависимости $\psi(x)$ в виде $\psi_0(x) = ax$. Далее можно вычислить

$$v_1 = \frac{a\lambda}{2\pi} + \frac{\lambda}{T_\psi}, \quad v_2 = \frac{a\lambda}{2\pi} - \frac{\lambda}{T_\psi}.$$

Очевидно, случай равенства амплитуд интерферирующих волн имеет лишь теоретическое значение, поскольку на практике встречается крайне редко.

Рассмотрим случай, когда $U_1 \neq U_2$. Положим для определенности $U_2 = R \cdot U_1, R < 1$. Найдем комплексную амплитуду суммарного сигнала

$$\begin{aligned} \dot{U}(x) &= U(x) \exp\{j \cdot \psi(x)\} = U_1 \cdot \exp\left\{j \cdot \left(\frac{2\pi}{\lambda} x v_1 + \gamma_1\right)\right\} \times \\ &\times \left[1 + R \cdot \exp\left\{j \cdot \left[\frac{2\pi}{\lambda} x (v_2 - v_1) + \gamma_2 - \gamma_1\right]\right\} \right]. \end{aligned}$$

Отсюда находим фазу суммарного сигнала в точке x антенной системы

$$\psi(x) = kxv_1 + \gamma_1 + \operatorname{arctg} \frac{R \cdot \sin \left[\frac{2\pi x}{\lambda} (v_2 - v_1) + \gamma_2 - \gamma_1 \right]}{1 + R \cdot \cos \left[\frac{2\pi x}{\lambda} (v_2 - v_1) + \gamma_2 - \gamma_1 \right]}. \quad (8)$$

Зависимость $\psi(x)$ (8) содержит два слагаемых:

$$\psi(x) = \psi_0(x) + \Delta\psi(x).$$

Первое из слагаемых – уравнение прямой, характеризующей изменение вдоль оси x фазы более сильного сигнала:

$$\psi_0(x) = \frac{2\pi}{\lambda} x v_1 + \gamma_1. \quad (9)$$

Второе слагаемое

$$\Delta\psi(x) = \arctg \frac{R \cdot \sin \left[\frac{2\pi x}{\lambda} (\nu_1 - \nu_2) + \gamma_1 - \gamma_2 \right]}{1 + R \cdot \cos \left[\frac{2\pi x}{\lambda} (\nu_1 - \nu_2) + \gamma_1 - \gamma_2 \right]} \quad (10)$$

описывает периодические колебания фазы вокруг прямой (9). Нетрудно показать, что период этих колебаний

$$T_\psi = \frac{\lambda}{\Delta\nu}, \quad (11)$$

а амплитуда

$$\Delta\psi_{\max} = \arctg \frac{R}{\sqrt{1-R^2}}. \quad (12)$$

Зависимость (8) для частных случаев представлена на рис. 3. Заметим, что она несет информацию об угловом положении обоих ИРИ. Заметим также, что колебания $\psi(x)$ относительно среднего значения, определяемые формулой (8), свидетельствуют о воздействии на входы пеленгатора двух волн (случай большего количества волн в статье не рассматривается). Амплитуда колебаний в соответствии с формулой (10) никогда не превышает $\pi/2$ и быстро убывает с уменьшением отношения амплитуд интерферирующих волн в соответствии с формулой (12). Этот эффект можно трактовать как подавление слабого сигнала сильным в нелинейных системах обработки. Извлечение фазы из сигнала является нелинейной процедурой. Эффект подавления слабого сигнала сильным отмечается в ряде работ по антенным решеткам, например, в [5, 6], но его физическая природа не раскрывается.

Проиллюстрируем далее полученные общие закономерности, а именно возможность углового разрешения сигналов с различными амплитудами, и подавление слабого сигнала сильным, на конкретном примере.

Рассмотрим многобазовый фазовый пеленгатор, в котором разрешение неоднозначности и оценка пеленга производятся методом «суммирования косинусоид» [4]. Метод устранения неоднозначности и оценки пеленга заключается в том, что формируются n (по числу измерительных баз) гармонических колебаний, начальные фазы которых равны разностям фаз сигналов на соответствующих базах, а частоты пропорциональны базам. Пеленг определяется по положению максимума суммы полученных колебаний

$$S_{\varphi}(v) = \sum_{i=1}^n A_0 \cos(2\pi \cdot f_i \cdot t - \varphi_i), \quad (13)$$

где φ_i – разность фаз сигналов на i -базе; f_i – частота i -го колебания, пропорциональная соответствующей измерительной базе, так что $f_i t = x_i \cdot v$,

$x_i = \frac{l_i}{\lambda}$, n – количество фазометрических баз.

Если на антенны пеленгатора падает одна плоская волна под углом α_1 , так что

$$\varphi_i + 2\pi k_i = x_i \nu_1, \quad \nu_1 = \sin \alpha_1,$$

из (13) получаем

$$S_{\varphi}(v) = \sum_{i=1}^n A_0 \cos[2\pi \cdot x_i (v - \nu_1)]. \quad (14)$$

Как следует из формулы (14), это периодическая функция с периодом по v , равным $\frac{1}{x_1} = \frac{\lambda}{l_1}$, главный максимум которой лежит в точке $v = \nu_1$.

Предположим далее, что антенная система пеленгатора представляет собой эквидистантную антенную решетку и все разности фаз измеряются относительно опорной антенны, как показано на рис. 2, так что $x_i = x_1 \cdot i$, $i = 1, 2, \dots, n$. Выбор именно такой антенной решетки обусловлен тем, что в ней наиболее полно реализуются возможности устранения неоднозначности фазовых измерений. Для этого случая из (14) имеем, воспользовавшись [7],

$$S_{\varphi}(v) = n \cos[(n+1)x_1 \pi (v - \nu_1)] \frac{\sin(n\pi x_1 (v - \nu_1))}{n \cdot \sin(\pi x_1 (v - \nu_1))}. \quad (15)$$

Главный максимум функции (15) точно соответствует истинному пеленгу, ширина главного лепестка равна $\frac{\lambda}{l_1(n+1)}$. Вид функции (15) иллюстрируется рис. 4, построенным для $x_1 = 1$, $A_0 = 1$.

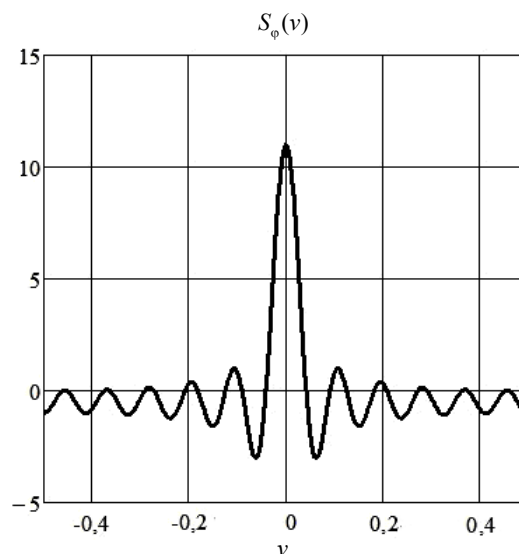


Рис. 4. Отклик пеленгатора с эквидистантной антенной решеткой на одну плоскую волну, $N=12$

Видно, что боковые лепестки функции не препятствуют правильному устранению неоднозначности измерений. Данный и последующий рисунки построены в среде MathCAD.

Предположим теперь, что на антенную систему пеленгатора падают две плоские волны под углами α_1 и α_2 . Используя формулу (8) для фазы суммарного сигнала в точке $x_i = l_i/\lambda$ антенной решетки, представим формулу (13) в виде [8]

$$S_{\bar{\varphi}}(v) = \sum_{i=1}^n \frac{A(i, v, v_1, v_2, \gamma)}{\sqrt{B(i, v_1, v_2, \gamma)}}, \quad (16)$$

где

$$\begin{aligned} A(i, v) &= \cos[2\pi x_i(v - v_1)] + R^2 \cdot \cos[2\pi x_i(v - v_2)] + \\ &+ 2R \cos[\pi x_i(v_2 - v_1) + \gamma] \cdot \cos\left[2\pi x_i\left(v - \frac{v_1 + v_2}{2}\right)\right], \\ B(i) &= 1 + R^4 + 4R^2 \cos^2[\pi x_i(v_2 - v_1) + \gamma] + \\ &+ 2 \cdot R^2 \cdot \cos[2\pi x_i(v_2 - v_1)] + \\ &+ 4 \cdot (R^3 + R) \cdot \cos[\pi x_i(v_2 - v_1)] \cdot \cos[\pi x_i(v_2 - v_1) + \gamma], \\ v_1 &= \sin \alpha_1, \quad v_2 = \sin \alpha_2, \quad \gamma = \gamma_2 - \gamma_1. \end{aligned}$$

В соответствии с (16) отклик пеленгатора на две принимаемые волны представляется суммой трех слагаемых. Первое слагаемое

$$S_{1\bar{\varphi}}(v) = \sum_{i=1}^n \frac{\cos[2\pi \cdot x_i(v - v_1)]}{\sqrt{B(i)}} \quad (17)$$

можно рассматривать как отклик пеленгатора на первую падающую волну. Второе слагаемое имеет такую же структуру и может рассматриваться как отклик на вторую падающую волну. Третье слагаемое является продуктом нелинейного взаимодействия сигналов в процессе их обработки.

$$S_{3\bar{\varphi}}(v) = \sum_{i=1}^n \frac{2R \cos[\pi x_i \Delta v + \gamma] \cos[2\pi x_i(v - \frac{v_1 + v_2}{2})]}{\sqrt{B(i)}}. \quad (18)$$

Данное слагаемое зависит от разности фаз γ и существенно влияет на возможность их разрешения. Действительно, если $\gamma = 0$, формула (16) приобретает вид

$$S_{\bar{\varphi}}(v) = \sum_{i=1}^n \frac{(1+R)[\cos[\pi x_i(v - v_1)] + R \cos[\pi x_i(v - v_2)]]}{\sqrt{B(i)}}. \quad (19)$$

Интерференционный член из формулы (16) исчезает, и разрешение сигналов по v зависит только от степени их близости.

Если же $\gamma = \pi$, то

$$S_{\bar{\varphi}}(v) = \sum_{i=1}^n \frac{(1-R)[\cos[\pi x_i(v - v_1)] - R \cos[\pi x_i(v - v_2)]]}{\sqrt{B(i)}}. \quad (20)$$

В точке $v = v_2$, соответствующей углу прихода волны с меньшей амплитудой, перед вторым слагаемым сохраняется знак «минус», т.е. максимума $S_{\bar{\varphi}}(v)$ в этой точке нет. Сигнал с меньшей амплитудой подавлен более сильным, волны не разрешаются. Таким образом, возможность разрешения сигналов зависит от разности фаз падающих волн.

Допустим далее, что принимаемые сигналы некогерентны, так что разность фаз γ – случайная величина, распределенная равномерно на интервале $\pm\pi$. Найдем при этих условиях среднее значение суммы (16). Основанием для применения данного алгоритма являлось то, что среднее по γ значение третьего (интерференционного) члена в числителе формулы (16) равно нулю. Однако от γ зависит и

знаменатель формулы, так что заранее результат усреднения не очевиден.

Результат получим численным методом, полагая $\gamma_i = i \cdot \frac{2\pi}{6}$, $i = 0, 1, \dots, 5$. Так что среднее значение суммы (16)

$$\bar{S}_{\bar{\varphi}}(v) = \frac{1}{6} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{A(i, v, v_1, v_2, \gamma)}{\sqrt{B(i, v_1, v_2, \gamma)}}. \quad (21)$$

На рис. 5 приведены результаты расчетов для эквидистантной решетки с $N = 12$, $x_1 = 1$, $R = 0,95$, $v_1 = 0$, $v_2 = 0,24$.

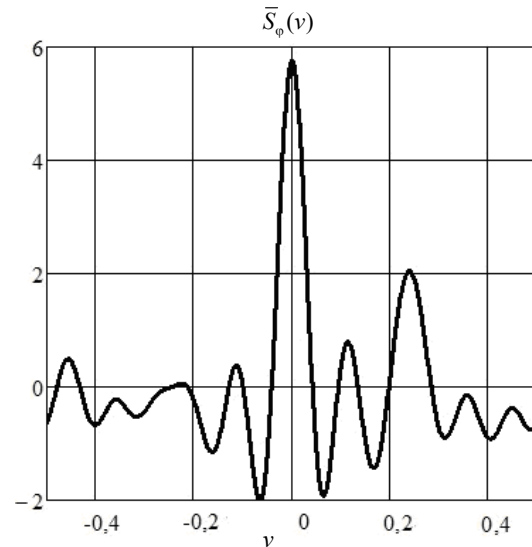


Рис. 5. Отклик пеленгатора с эквидистантной антенной решеткой на воздействие двух некогерентных волн: $N = 12$, $v_1 = 0$, $v_2 = 0,24$, $R = 0,95$

Видно, что сигналы разрешаются, хотя и наблюдается подавление меньшего по амплитуде: отношение амплитуд входных сигналов 0,95, отношение откликов 0,36. Возникает вопрос о предельно малом угловом разnose источников некогерентных сигналов, при котором они разрешаются. Для «сплошной» решетки и равных по амплитуде сигналов он рассмотрен в монографии [8]. Под «сплошной» понимается гипотетическая решетка, имеющая бесконечное количество элементов с бесконечно малыми расстояниями между ними [9]. В этих условиях предел разрешения равен $0,85 \cdot \frac{\lambda}{L}$ (L – длина решетки) по критерию наличия двух максимумов в кривой $\bar{S}_{\bar{\varphi}}(v)$. Подтверждается известный факт, что в решетках с нелинейной обработкой сигналов может быть получено угловое разрешение, на 15–20% превосходящее критерий Рэлея [5].

Для рассматриваемой эквидистантной решетки с количеством элементов $N = 12$, на входе которой два некогерентных сигнала с угловым разansom $0,85 \cdot \frac{\lambda}{L}$ и отношением амплитуд $R = 0,95$, кривая $\bar{S}_{\bar{\varphi}}(v)$ приведена на рис. 6.

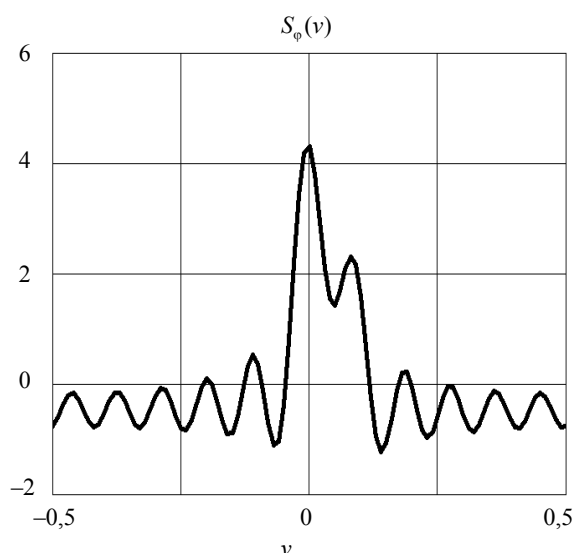


Рис. 6. Отклик пеленгатора с эквидистантной антенной решеткой на воздействие двух некогерентных волн: $N=12$, $v_1=0$, $v_2=0,07$, $R=0,95$

Кривая имеет два четких максимума, соответствующих угловым положениям источников излучения с некоторой погрешностью и значительно превышающих побочные максимумы, связанные с неоднозначностью фазовых измерений. Сигналы разрешаются, притом отношение амплитуд входных сигналов $R=0,95$ уменьшилось в отклике больше чем вдвое. Уменьшение амплитуды более слабого сигнала приводит к его еще более сильному подавлению в процессе обработки.

При $R \leq 0,7$ слабый сигнал практически не влияет на выходную функцию измерителя $\bar{S}_\varphi(v)$.

Выясним причины подавления слабого сигнала, используя полученные ранее математические соотношения. Анализируя числители формул (19), (20), видим, что подавление более слабого сигнала происходит, если разность фаз интерферирующих волн γ близка к π , и не происходит, если она близка к нулю. Но от γ зависят не только числители формул, но и их знаменатели. При разности фаз γ , близкой к π , знаменатель меньше, чем при разности фаз γ , близкой к нулю, что подчеркивает соответствующие составляющие при усреднении $\bar{S}_\varphi(v)$ по γ . Это и приводит к подавлению более слабого сигнала.

Выясним далее влияние неполноты (разреженности) антенной решетки. Антенные решетки фазовых пеленгаторов большей частью не являются эквидистантными. Существуют антенные структуры, которые при заданном числе элементов N и заданном отношении l_n/λ , где l_n – максимальная фазометрическая база, являются оптимальными с точки зрения получения максимальной вероятности правильного устранения неоднозначности. Набор таких структур приведен в [4]. Дальнейший анализ приводится для этих решеток. На рис. 7 приведен отклик

$\bar{S}_\varphi(v)$ на воздействие двух некогерентных волн пеленгатора, антенная система которого содержит 6 элементов, образующих фазометрические базы $\vec{x}=(3; 5; 6; 7; 11)$.

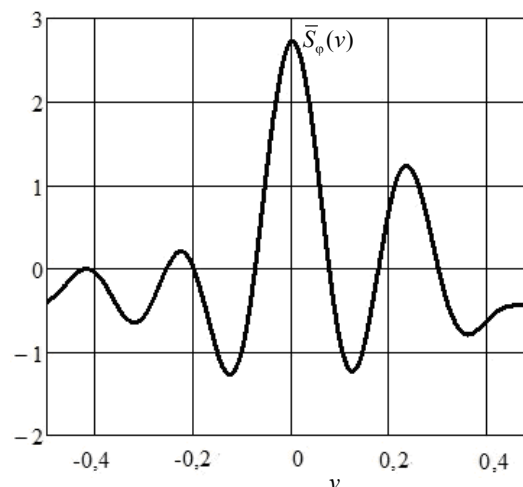


Рис. 7. Отклик пеленгатора с антенной решеткой (3; 5; 6; 7; 11) на воздействие двух некогерентных волн: $N=12$, $v_1=0$, $v_2=0,24$, $R=0,95$

Габаритный размер решетки такой же, как и в рассматриваемой эквидистантной с $N=12$. Из рис. 7 видно, что неоднозначность измерения устраняется, сигналы разрешаются, слабый сигнал подавляется более сильным. Аналогичные результаты получаются при моделировании работы пеленгаторов с иными оптимальными антенными системами.

Один из возможных вариантов технической реализации многобазового фазового пеленгатора, в котором для устранения неоднозначности измерений применен метод «суммирования косинусоид» с усреднением по начальным фазам принимаемых некогерентных сигналов, приведен в монографии [8].

Таким образом, в данной статье:

- показана принципиальная возможность углового разрешения некогерентных волн в фазовом пеленгаторе с антенными системами в виде линейных решеток;
- выявлены физические причины подавления слабого сигнала сильным в подобных системах;
- и то и другое проиллюстрировано на примере пеленгатора, в котором устранение неоднозначности и измерение пеленга производится известным методом «суммирования косинусоид».

Метод «суммирования косинусоид» использован в статье для иллюстрации возможности и предела разрешения источников некогерентных сигналов в многобазовых фазовых пеленгаторах. Метод использован нами в силу наглядности получаемых результатов. Очевидно, могут быть разработаны иные схемы построения пеленгаторов, реализующие принципиальные возможности разрешения и более подходящие в конкретных условиях применения.

Работа выполнена в рамках проекта по госзадачу Минобрнауки РФ № 8.7348.2017/8.9.

Литература

1. Рембовский А.М. Радиомониторинг: задачи, методы, средства / А.М. Рембовский, А.В. Ашихмин, В.А. Козьмин; под ред. А.М. Рембовского. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 492 с.
2. Куприянов А.И. Радиоэлектронная борьба. Основы теории / А.И. Куприянов, Л.Н. Шустов. – М.: Вузовская книга, 2011. – 800 с.
3. Южаков В.В. Фазовые интерферометры в микроволновых системах посадки: обзор // Зарубежная радиоэлектроника. – 1977. – № 6. – С. 50–66.
4. Белов В.И. Теория фазовых измерительных систем. – Томск: Изд-во ТУСУРа, 1994. – 102 с.
5. Шоу Е. Теоретические и экспериментальные исследования разрешающей способности мультипликативных и аддитивных антенных решеток / Е. Шоу, Д. Девис // Зарубежная радиоэлектроника. – 1965. – № 11. – С. 103–123.
6. Хансен Р.С. Сканирующие антенные системы СВЧ: в 3-х т.: пер. с англ. / под ред. Г.Т. Маркова, А.Ф. Чаплина. – М.: Сов. Радио, 1966. – Т. 1. – 536 с.; 1969. – Т. 2. – 496 с.; 1971. – Т. 3. – 464 с.
7. Градштейн И.С. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений / И.С. Градштейн, И.М. Рыжик. – М.: Гос. изд-во физико-математической литературы, 1963. – 1108 с.
8. Денисов В.П. Фазовые радиопеленгаторы / В.П. Денисов, Д.В. Дубинин. – Томск: ТУСУР, 2002. – 251 с.
9. Урковитц Г. Функция угловой неоднозначности дискретно-непрерывной решетки // Труды Института радиоинженеров. – 1963. – № 12. – 1745 с.

Денисов Вадим Прокопьевич

Д-р техн. наук, профессор
каф. радиотехнических систем ТУСУРа
Тел.: (382-2) 41-36-70
Эл. почта: dvp@ms.tusur.ru

Дубинин Дмитрий Владимирович

Канд. техн. наук, доцент каф.
радиоэлектроники и защиты информации ТУСУРа
Тел.: (382-2) 41-33-65
Эл. почта: dvd012@mail.ru

Ерофеев Денис Вадимович

Аспирант каф. радиотехнических систем ТУСУРа
Тел.: +7-923-427-80-94
Эл. почта: erofeev_dv@mail.ru

Denisov V.P., Dubinin D.V., Erofeev D.V.

Questions of resolving ability of phase direction finder with antenna system in the form of linear array

The multiple-base phase direction finders with antenna systems in the form of linear array are considered, in which the elimination of the ambiguity of phase measurements and the bearing estimation are carried out by the «summation of cosine» method. It is shown that such direction finders have angular resolving power corresponding to the Rayleigh criterion. The reason for the suppression of a weak signal is found to be stronger during processing.

Keywords: resolving ability, phase direction finders.

УДК 53.082.74

А.С. Запасной, В.П. Беличенко, А.С. Мироньчев

Исследование возможностей применения макета ближнепольного интерференционного микроволнового микроскопа для задач гигроскопии и дефектоскопии

Обсуждается схемное решение ближнепольного интерференционного микроволнового микроскопа – прибора нового типа. Это схемное решение реализовано в виде максимально упрощенного по структуре действующего макета. Результаты тестовых испытаний по выявлению возможностей микроскопа показали, что его целесообразно использовать при решении задач гигроскопии и дефектоскопии, исследовании предметов культурного наследия, а также в медицине.

Ключевые слова: ближнепольная диагностика, интерференционный поток энергии, эванесцентные поля, микроволновый микроскоп, гигроскопия, дефектоскопия.

doi: 10.21293/1818-0442-2017-20-4-17-19

Сфера применений ближнепольной микроволновой микроскопии все больше расширяется [1–7]. В настоящее время в ее рамках решаются также проблемы, встречающиеся в медицине [8], и при исследовании предметов культурного наследия [9]. Однако в современных микроскопах реализуется режим зондирования с использованием одного зонда. Это замечание в равной мере относится как к приборам, оснащенным резонансными зондами, так и к приборам, в которых применяются нерезонансные зонды (как правило, в виде открытых концов коаксиальных линий различного сечения) [10]. В то же время исследования, проведенные в [11–13], демонстрируют целесообразность осуществления зондирования перекрывающимися ближними (эванесцентными) полями систем излучателей. Потенциальные возможности такого метода зондирования обсуждаются в данной работе.

1. Методика и техника эксперимента

Макет предлагаемого микроволнового интерференционного микроскопа содержит следующие основные элементы: анализатор цепей PNA-L Network Analyzer (N5230C) компании Agilent Technologies, полоса рабочих частот которого составляет 10 МГц – 40 ГГц; коаксиальные линии переменного сечения, выполненные в виде коаксиальных конических рупоров; делитель мощности; дополнительные отрезки линии передачи (рис. 1). Анализатор цепей позволяет производить измерения с высокой скоростью и большой точностью, а правильная калибровка обеспечивает корректировку двенадцати составляющих погрешности.

Макет работает следующим образом. Сигнал от анализатора цепей по коаксиальному кабелю поступает на делитель мощности, работающий на частотах 10 МГц – 7 ГГц и при мощности до 0,5 Вт. После делителя мощности сигналы поступают на входы коаксиальных конических рупоров. Апертуры рупоров обращены навстречу друг другу, в зазор между ними помещается исследуемый образец и измеряется коэффициент отражения от входа делителя мощности. Создание требуемого фазового

сдвига между сигналами, поступающими на рупоры, достигается за счет включения в тракт передачи дополнительных отрезков линии передачи, тем самым обеспечивается управление интерференционными потоками энергии, образующимися в перекрывающихся эванесцентных полях коаксиальных конических рупоров. У рупоров диаметр центрального проводника в плоскости апертуры составляет 30 мм, а внутренний диаметр внешнего проводника – 70 мм. Это позволяет при использовании микроволнового излучения с частотами от 10 МГц до 7 ГГц в достаточно широких пределах регулировать размер зоны перекрытия эванесцентных полей таких рупоров в условиях зондирования среды или объекта встречными эванесцентными полями рупоров. Внешний вид макета микроволнового интерференционного микроскопа представлен на рис. 1.



Рис. 1. Макет микроволнового интерференционного микроскопа

Для выявления возможностей предлагаемого макета микроволнового интерференционного микроскопа и оценки качества получаемых с его помо-

щью результатов они сравнивались с результатами измерений, полученными с помощью установки, имеющей только один рупор. При этом все измерения проводились в ближних полях. Таким образом, сопоставлялись результаты измерений, полученные с использованием перекрывающихся (два рупора) и неперекрывающихся (один рупор) эванесцентных полей.

В качестве данных, регистрируемых с анализатора цепей, в обоих случаях выбран комплексный коэффициент отражения. Полоса частот при измерениях составила 500 МГц – 4 ГГц. Шаг дискретизации равен 250 кГц, так как в выбранном диапазоне частот измерения осуществлялись на 14000 точек. Для удобства восприятия во время каждого измерения регистрируемые сигналы нормировались на коэффициент отражения в отсутствие исследуемых образцов. В дальнейшем этот параметр будем обозначать как нормированный коэффициент отражения (НКО, NS11).

2. Интерпретация и анализ экспериментальных результатов

Для более детального анализа чувствительности предлагаемого макета выполнена серия экспериментов, касающихся гигроскопических свойств материалов. В одном из экспериментов в качестве исследуемого образца была выбрана пластина эластичного пенополиуретана (поролон) толщиной 25 мм в связи с его пористой структурой и способностью хорошо вбирать в себя воду.

Эксперимент был поставлен следующим образом. После настройки и калибровки установки были получены данные измерений сухой пластины поролон (рис. 2, кривая 1), далее пластина обильно смачивалась до полного намочения, помещалась между рупорами (рис. 2, кривая 2). Кривая 3 на рис. 2 соответствует данным снятым через 5 мин. За это время пластина потеряла достаточное количество воды. Последняя зависимость (рис. 2, кривая 4) была получена из данных, записанных спустя 10 мин после первого измерения пропитанной водой пластины поролон.

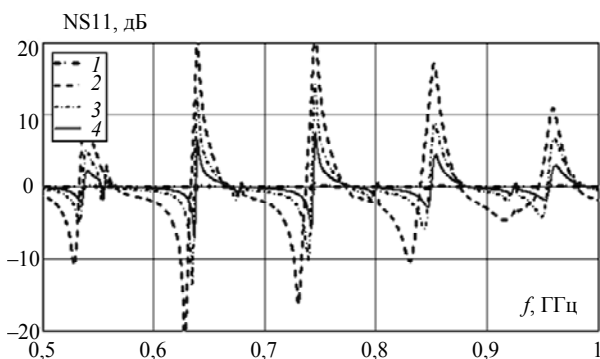


Рис. 2. Зависимость от частоты НКО для увлажненной пластины поролон толщиной 25 мм: 1 – сухая пластина, 2 – увлажненная, 3 – через 5 мин и 4 – через 10 мин после увлажнения

Представленные зависимости наглядно показывают, что предлагаемый в данной работе макет мик-

роволнового интерференционного микроскопа позволяет регистрировать даже незначительные изменения содержания влаги в материалах. Это свойство микроскопа может найти применение при решении задач гигроскопии.

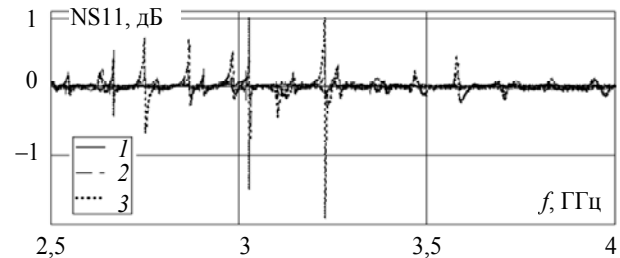


Рис. 3. Зависимость от частоты коэффициента отражения от доски ламината толщиной 5 мм: 1 – сплошной ламинат, 2 – с отверстием диаметром 3 мм, 3 – с отверстием диаметром 4 мм

Другая серия экспериментов относилась к выяснению возможностей макета при диагностике качества материалов. Объектами исследований были выбраны изделия из дерева, имеющие те или иные дефекты, в том числе и скрытые. В качестве примера на рис. 3 представлены результаты диагностики доски ламината, имеющей дефекты в виде сквозных отверстий диаметром 3 и 4 мм.

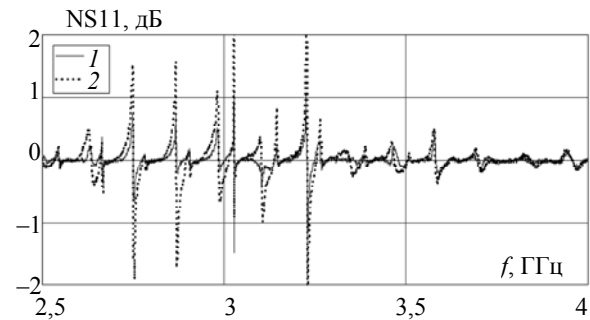


Рис. 4. Зависимость от частоты НКО для доски ламината толщиной 5 мм: 1 – с отверстием диаметром 4 мм, 2 – с отверстием диаметром 10 мм

Как видно, макет позволил надежно обнаруживать подобные дефекты. На рис. 4 показано, как с увеличением диаметра отверстия до 10 мм увеличивается и амплитуда принимаемого сигнала. Существенно подчеркнуть, что дефект диаметром 3–4 мм фиксируется (см. рис. 3 и 4) даже на частоте $f \approx 2,6$ ГГц используемого электромагнитного излучения (при этом длина волны составляет 11,5 см). Это обстоятельство наглядно показывает весьма существенное преодоление известного фундаментального предела на разрешение «в дальних полях».

Для демонстрации отличий традиционной технологии зондирования от вышеописанной нами проведен эксперимент по диагностике дефекта доски ламината с использованием эванесцентных полей только одного зонда. При этом было обнаружено, что наличие дефекта (даже диаметром 10 мм) крайне слабо влияет на измеренный НКО. Это подтверждает высказанное выше предположение об увели-

чении чувствительности предлагаемой технологии зондирования по сравнению с традиционными.

Выводы

По результатам проведенных экспериментов можно сделать выводы о преимуществах использования при ближнепольной диагностике перекрывающихся эванесцентных полей систем излучателей. Прежде всего, можно отметить весьма значительное отличие чувствительности микроволнового интерференционного микроскопа от чувствительности прибора, использующего традиционное конструктивное исполнение. В особенности явственно этот эффект проявился в экспериментах, касающихся гироскопических свойств материалов, а также при обнаружении дефектов изделий из дерева.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и администрации Томской области в рамках научного проекта № 16-42-700942 регионального конкурса (р_сибирь_a).

Литература

1. Gaikovich K.P. Inverse problem of near-field scattering in multilayer media / K.P. Gaikovich, P.K. Gaikovich // *Inverse Problems*. – 2010. – Vol. 26, No. 12. – P. 125013-20.
2. Reznik A.N. Quasistatics and electrodynamics of near-field microwave microscope // *Journal Applied Physics*. – 2014. – Vol. 115, No. 8. – P. 084501-8.
3. Pseudopulse near-field subsurface tomography / K.P. Gaikovich, P.K. Gaikovich, Ye.S. Maksimovitch, V.A. Badeev // *Physical Review Letters*. – 2012. – Vol. 108, No. 16. – P. 163902.
4. Резонансная ближнепольная СВЧ-диагностика неоднородных сред / А.В. Костров, А.И. Смирнов, Д.В. Янин и др. // *Известия РАН. Сер. Физическая*. – 2005. – Т. 69, № 12. – С. 1716–1720.
5. Диагностика параметров плазмы атмосферного давления методом ближнепольного СВЧ-зондирования / Д.В. Янин, А.В. Костров, А.И. Смирнов и др. // *Журнал технической физики*. – 2012. – Т. 82, № 4. – С. 42–51.
6. Подповерхностная диагностика квазиодномерных неоднородностей методом резонансного ближнепольного СВЧ-зондирования / Д.В. Янин, А.Г. Галка, А.В. Костров и др. // *Изв. вузов. Радиофизика*. – 2014. – Т. 57, № 1. – С. 35–47.
7. Резонансная ближнепольная СВЧ-диагностика неоднородных сред / Д.В. Янин, А.Г. Галка, А.И. Смирнов и др. // *Успехи прикладной физики*. – 2014. – Т. 2, № 6. – С. 555–570.
8. Резник А.Н. Обнаружение контрастных образований внутри биологических сред при помощи ближнепольной СВЧ-диагностики / А.Н. Резник, Н.В. Юрасова // *Журнал технической физики*. – 2006. – Т. 76, № 1. – С. 90–104.
9. Diagnostics and monitoring of frescoes using evanescent-field dielectrometry / R. Olmi, M. Bini, A. Ignesti et al. // *Measurement Science and Technology*. – 2006. – Vol. 17, No 8. – P. 2281–2288.

10. Anlage S.M. Scanning Probe Microscopy: Electrical and Electromechanical Phenomena at the Nanoscale, V. 1 / S.M. Anlage, V.V. Talanov, A.R. Schwartz / Eds. S.V. Kalinin and A. Gruverman. – New York: Springer-Verlag, 2007. – P. 15–253.

11. Беличенко В.П. Управление величиной и пространственным распределением интерференционных потоков энергии в ближних полях систем идентичных излучателей / В.П. Беличенко, А.С. Запасной, П.В. Шестаков // *Оптика и спектроскопия*. – 2015. – Т. 118, № 4. – С. 633–636.

12. Беличенко В.П. Роль эванесцентных полей в процессе формирования излучения комбинированных излучающих систем / В.П. Беличенко, А.С. Запасной, П.В. Шестаков // *Оптика и спектроскопия*. – 2015. – Т. 118, № 4. – С. 630–632.

13. The technology of near-field interference microwave sensing / V.P. Belichenko, A.S. Zapasnoy, A.S. Miron'chev, P.V. Shestakov // *Material Science Forum*. – 2016. – Vol. 870. – P. 730–734.

Запасной Андрей Сергеевич

Кандидат физ.-мат. наук, доцент каф. радиофизики (РФ) Национального исследовательского Томского государственного университета (НИ ТГУ)
Тел.: +7-961-095-96-97
Эл. почта: zas_rff@live.com

Беличенко Виктор Петрович

Доктор физ.-мат. наук, профессор каф. РФ НИ ТГУ
Тел.: +7 (382-2) 41-34-63
Эл. почта: bvp@mail.tsu.ru

Мироньчев Александр Сергеевич

Аспирант каф. РФ НИ ТГУ
Тел.: +7 (382-2) 41-34-63
Эл. почта: mironchev42@mail.ru

Zapasnoy A.S., Belichenko V.P., Mironchev A.S.

Research of application possibilities for model of near-field microwave interference microscope to solve the problems in hygrosopy and defectoscopy

The authors discuss the schematic of a near-field microwave interference microscope - a new type of instrument. This circuit design is implemented in the most simplified structure of the current layout. The testing to identify the scope of this microscope is provided. It was shown that the microscope should be used to solve a number of hygroscope and flaw detection problems, investigation of cultural heritage items, and also in medicine.

Keywords: near-field diagnostics, interferential spatial scale, interference energy flux, evanescent field, microwave microscope, hygrosopy, defectoscopy.

УДК 621.396.677

С.К. Доманов, Г.Г. Гошин

Исследование влияния увеличения шага ближнеполевого сканирования на точность восстановления диаграммы направленности бортовой антенны космического аппарата

По результатам измерения амплитудно-фазового распределения (АФР) ближнего поля на плоскости исследовано влияние увеличения шага сканирования на точность восстановления диаграммы направленности (ДН) бортовой двухзеркальной осесимметричной антенны эллиптической поляризации Ка-диапазона. Показано, что, исходя из требования к углу восстановления ДН, можно увеличить рекомендуемый шаг сканирования без снижения точности восстановления ДН и при этом пропорционально уменьшить время измерений. Отмечено, что теоретические оценки недостаточно согласуются с практическими результатами. Измерения проведены в безэховой экранированной камере (БЭК).

Ключевые слова: антенные измерения, ближнее поле, шаг сканирования.

doi: 10.21293/1818-0442-2017-20-4-20-22

В настоящее время оценка радиотехнических характеристик (РТХ) антенн по результатам измерений поля в ближней зоне стало общемировым трендом [1]. Данный метод антенных измерений позволяет избежать ряда недостатков, которые характерны для традиционных методов измерений в дальней зоне, и обладает следующими преимуществами:

- Повышенная стабильность измерений, обеспечиваемая применением БЭК, в которой может поддерживаться необходимый температурно-влажностный режим и режим чистой технологической зоны [2], тем самым исключается негативное влияние погодных условий и излучение паразитных радиоисточников.

- Возможность анализа поля на апертуре антенны.

- Относительно низкая ресурсозатратность по сравнению с коллиматорным методом [3].

Методы измерений в ближней зоне являются частным случаем амплифазометрических методов измерений антенн [4–6]. Суть методов измерений в ближней зоне заключается в определении амплитуд и фаз тангенциальных (касательных) составляющих вектора напряжённости электрического поля на заданной поверхности вблизи антенны. После чего осуществляются математические преобразования измеренных данных по алгоритмам, соответствующим виду поверхности сканирования, на которой проводились измерения. На сегодняшний день предпочтительными поверхностями сканирования являются плоскость, цилиндр и сфера, в связи с относительной простотой реализации кинематических схем перемещения зондовой антенны и относительной простотой математических алгоритмов (по сравнению с более сложными видами поверхностей сканирования). Вспомогательной антенной является так называемый зонд – слабонаправленная антенна (в нашем случае – открытый конец прямоугольного волновода). Амплитуды и фазы поля исследуемой антенны (ИА) измеряются в частотной области посредством амплифазометров, в качестве которых используются векторные анализаторы цепей (ВАЦ).

В качестве современной аппаратной реализации метода участвуют автоматизированные измерительно-вычислительные комплексы (АИВК) ближнего поля, основой которых является прецизионный электрически управляемый позиционер (сканер), перемещающийся в заданной системе координат [7, 8].

Радиотехнические характеристики остронаправленных антенн, к которым относится рассматриваемая нами антенна, измеряются на плоской поверхности сканирования, поскольку поле данного типа антенн сосредоточено преимущественно в первом полупространстве.

Тангенциальные составляющие вектора напряжённости электрического поля измеряются с шагом, определяемым условием

$$\Delta x = \Delta y \leq (\lambda/2), \quad (1)$$

где λ – рабочая длина волны.

Область сканирования выбирается из условия

$$L > D + 2 \cdot z \cdot \operatorname{tg}(\theta_{\max}), \quad (2)$$

где D – максимальный размер ИА; z – расстояние между плоскостью апертуры ИА и плоскостью сканирования; θ_{\max} – максимальный требуемый угол восстановления ДН, отсчитываемый от нормали к апертуре антенны.

Для сканирования на плоскости значение θ_{\max} , как правило, находится в пределах от 60 до 70° [9].

Условие (1) позволяет минимизировать погрешность за счёт дискретизации измеряемого поля. Увеличение шага сканирования приведёт к снижению точности измерений и при этом сократит время сканирования. Для многих практических задач это является целесообразным. К таким задачам относятся оценка точности наведения ДН антенн космических аппаратов (КА) на требуемую зону обслуживания, а также предварительная настройка антенны для получения информации об уровне первых боковых лепестков ДН и ширины главного лепестка. Для этого рационально выбирать параметры сканирования, позволяющие решить вышеуказанные задачи с максимальной эффективностью.

В [10] приводится соотношение, определяющее величину шага сканирования, достаточную для точного восстановления ДН в пределах требуемого угла θ_{\max} :

$$\Delta x = \Delta y \leq \lambda / 2 \sin(\theta_{\max}). \quad (3)$$

Цели данной работы – качественно и количественно оценить влияние увеличения шага сканирования на точность восстановления ДН; экспериментально проверить выполнимость условия (3); оценить уменьшение времени измерения за счёт выбора увеличенного шага сканирования.

АИВК представляет собой плоский сканер производства компании ООО «НПП «ТРИМ СШП Измерительные системы» с размерами 8×7 м. Точность позиционирования по направляющим составляет 0,2 мм, погрешность восстановления ДН на уровнях 0...-10 дБ не превышает 0,2 дБ, на уровнях -10...-20 – не более 0,3 дБ, на уровнях -20...-30 – не более 0,4 дБ, на уровнях -30...-40 – не более 0,5 дБ.

Объектом испытаний являлась двухзеркальная осесимметричная антенна Кассегрена Ка-диапазона, выполненная из углепластика, со следующими геометрическими характеристиками: основное зеркало – параболоид вращения диаметром 640 мм, малое зеркало – гиперboloид вращения диаметром 130 мм, облучатель – конический гофрированный рупор с диаметром апертуры 50 мм. Область сканирования выбиралась из условия (2). Расстояние от апертуры зонда до апертуры ИА составляло 300 мм; $\lambda \approx 11$ мм.

На рис. 1 представлена зависимость величины шага сканирования от требуемого угла восстановления ДН для вышеуказанной ИА, рассчитанная по формуле (3).

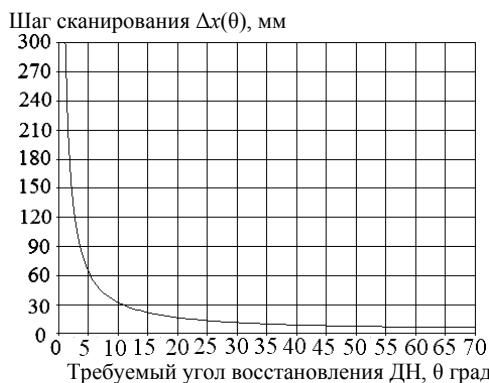


Рис. 1. Зависимость величины шага сканирования от требуемого угла восстановления ДН

Как видно из рис. 1, для требуемого угла восстановления ДН, равного 10° , по условию (3) шаг сканирования может составлять 31,5 мм, т.е. в 5,7 раза больше, чем рекомендуется условием (1).

На первом этапе эксперимента проводились статистические измерения (цикл из нескольких следущих друг за другом измерений) для подтверждения согласованности полученных результатов в пределах погрешности АИВК (рис. 2).

Как следует из рис. 2, результаты измерений полностью идентичны. Следующим этапом проводились измерения АФР с различным шагом сканирования, составляющим: $0,5\lambda$, λ , $1,5\lambda$, 2λ (рис. 3, 4).

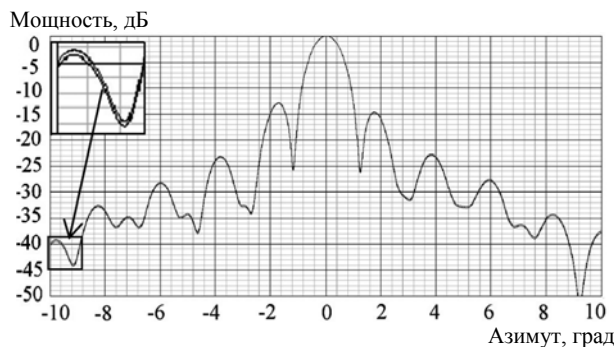


Рис. 2. Сечения ДН в азимутальной плоскости

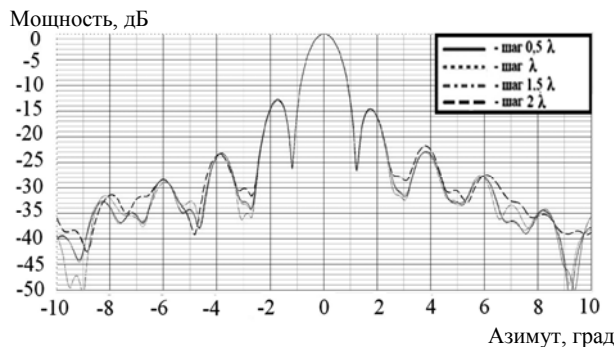


Рис. 3. Сечения ДН в азимутальной плоскости для различных шагов сканирования на средней частоте диапазона антенны

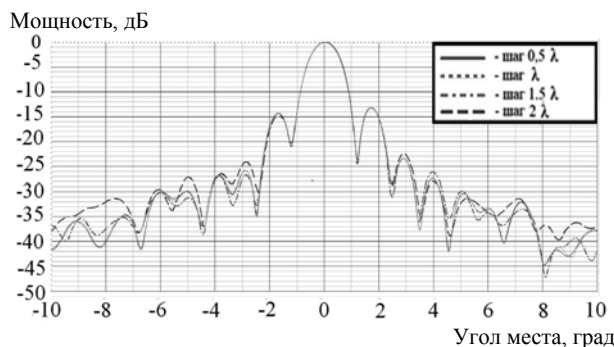


Рис. 4. Сечения ДН в угломестной плоскости для различных шагов сканирования на средней частоте диапазона антенны

По результатам анализа измеренных характеристик получено: значения ширины ДН отличаются в худшем случае на $0,01^\circ$, что не превышает погрешность измерения АИВК ($0,02^\circ$), отклонение электрической оси [11] не превышает $0,012^\circ$, что так же меньше погрешности АИВК ($0,02^\circ$), уровень первых боковых лепестков не согласуется в пределах 0,2 дБ при погрешности комплекса в 0,3 дБ.

Время измерений составило:

- для шага сканирования $0,5\lambda$: 2 ч 37 мин;
- для шага сканирования λ : 1 ч 14 мин;
- для шага сканирования $1,5\lambda$: 50 мин;
- для шага сканирования 2λ : 39 мин.

Таким образом, время измерений имеет зависимость от величины шага сканирования, близкую к обратно пропорциональной, и определяется комплексом факторов [12]. Стоит отметить, что предел увеличения шага сканирования определяется не только требуемой точностью восстановления ДН, но

и техническими возможностями механической системы сканера. Очевидно, что при достижении предельной скорости перемещения позиционера дальнейшее увеличение шага сканирования не будет приводить к сокращению времени измерений ввиду его механических ограничений.

Выводы

При увеличении шага сканирования точность восстановления ДН снижается. Выбор шага сканирования до 2λ не приводит к ухудшению точности восстановления ДН для основного и первых боковых лепестков ИА и находится в пределах погрешности АИВК. Ошибки восстановления ДН начинают превышать заявленную погрешность АИВК на уровнях:

- для шага 1λ : -35 дБ;
- для шага $1,5 \lambda$: -23 дБ;
- для шага 2λ : $-16 \dots -17$ дБ.

Стоит отметить, что в настоящее время оценка уровней кополярной (ДН по основной поляризации) ДН, соответствующих величине минус 35 дБ, является достаточной для большинства антенн КА. Поэтому для данных задач можно рекомендовать использование шага сканирования, равного одной длине волны с целью сокращения времени измерений.

Увеличение шага сканирования в 4 раза по сравнению с рекомендуемым привело к сокращению времени измерений приблизительно в 4 раза.

Таким образом, в зависимости от требуемых задач и требуемой точности измерений шаг сканирования в определённых пределах можно увеличивать. Это особенно актуально для задач предварительной настройки антенны, а также оценки точности наведения ДН ИА на требуемую зону обслуживания. Однако практические результаты измерений не в полной мере соответствуют теоретическим предположениям [соотношение (3)], что создаёт предпосылки актуальности проведения подобных исследований для каждого конкретного АИВК ближнего поля.

В дальнейшем планируется проведение статистических измерений для других типов антенн с целью разработки общих рекомендаций по возможностям увеличения шага сканирования. Также планируется проведение анализа влияния увеличенного шага сканирования на измерение кроссполяризационной развязки ИА.

Литература

1. Материалы научно-практического семинара по вопросам проведения антенных измерений в ближней зоне [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://trim-com.ru/post/9-materialy_nauchno_prakticheskogo_seminara.pdf, свободный (дата обращения: 10.07.2017).
2. Чистые помещения. Проектирование и монтаж. Общие требования. ГОСТ Р 56640–2015 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://allgosts.ru/13/040/gost_r_56640-2015, свободный (дата обращения: 17.07.2017).
3. Near-field vs Far-field [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.scribd.com/document/132587443/NSI-near-far-pdf>, свободный (дата обращения: 17.07.2017).
4. Бахрах Л.Д. Методы измерения параметров излучающих систем в ближней зоне / Л.Д. Бахрах, С.Д. Кременецкий, А.И. Курочкин. – Л.: Наука, 1985. – 272 с.
5. Белов Ю.И. Экспериментальное исследование характеристик направленности зеркальной антенны амплитудометрическим методом / Ю.И. Белов, Н.В. Векслер, Н.С. Коротков // Радиотехника и электроника. – 1981. – Т. 26, № 5. – С. 919–925.
6. Захарьев Л.Н. Методы измерения характеристик антенн СВЧ / Л.Н. Захарьев, А.А. Леманский, В.И. Турчин и др. – М.: Радио и связь, 1985. – 368 с.
7. ООО НПП «СШП ТРИМ», Автоматизированный измерительно-вычислительный комплекс (АИВК) для измерений радиотехнических характеристик антенн в составе КА и автономно ТМСА 1.0-40.0 БЗ/ГСП 044: руководство по эксплуатации, кн. 1, ТМСА.044.040.00Б РЭ. – СПб., 2012. – 41 с.
8. Исаков М.А. Перспективы реконструктивных антенных измерений как основного метода приёмосдаточных испытаний / М.А. Исаков, В.П. Лисинский // Вестник концерна ПВО «Алмаз–Антей». – 2015. – № 3. – С. 51–58.
9. Balanis C.A. Antenna theory. Analysis and design. – Second edition. – John Wiley & Sons, Inc., 1997. – 959 p.
10. Gregson St. Principles of Planar Near-Field Antenna Measurements / St. Gregson, J. McCormick, C. Parini // The Institution of Engineering and Technology. IET Electromagnetic Waves Series. – L.: United Kingdom, 2007. – 53 p.
11. Мухин А.В. Исследование отклонения диаграммы направленности офсетной антенны эллиптической поляризации / А.В. Мухин, С.К. Доманов // Доклады ТУСУРА. – 2016. – Т. 19, № 2. – С. 28–30.
12. Антохина Ю.А. Синтез характеристик антенн по измерениям в ближней зоне: моногр. / Ю.А. Антохина, А.Ф. Крячко, А.С. Ковалёв и др. – СПб.: ГУАП, 2016. – 309 с.

Доманов Сергей Константинович

Инженер АО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М.Ф. Решетнёва
Тел.: +7-913-571-35-25
Эл. почта: serzh.domanov@mail.ru

Гошин Геннадий Георгиевич

Д-р физ.-мат. наук, профессор каф. сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники (СВЧКР)
Томского государственного ун-та систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Эл. почта: goshingg@svch.tusur.ru

Domanov S.K., Goshin G.G.

Investigation of influence of near-field scan step size increment on antenna pattern reconstruction accuracy of a satellite onboard antenna

Based on planar near-field measurements of amplitude-phase distribution, a study of scan step size increment influence on antenna pattern reconstruction accuracy was performed using the example of a Ka-band elliptically polarized axisymmetric dual-reflector satellite onboard antenna. It is shown that on the basis of required angle of antenna pattern reconstruction, the recommended scan step can be incremented without degradation of pattern reconstruction accuracy and with proportional measurement time decrease. It was also discovered that theoretical estimates were not sufficiently consistent with practical results. The measurements were taken inside an anechoic chamber.

Keywords: antenna measurements, near-field, scan step size.

УДК 621.315.592

С.Г. Еханин, А.А. Томашевич

Исследование роли термопластических явлений в механизме деградации полупроводниковых гетероструктур на основе GaN

Проведена оценка роли термопластических явлений в расширении дефектных областей при формировании новых дефектов в гетероструктуре светодиода. Согласно расчету напряжений, возникающих при локальном перегреве, недостаточно для формирования новых дефектов, однако эти напряжения могут приводить к движению уже существующих дислокаций и их скоплению, что может приводить к формированию кластеров дислокаций, дополнительному перегреву и выходу светодиода из строя.

Ключевые слова: дислокации, нитрид галлия, гетероструктура, механическая прочность.

doi: 10.21293/1818-0442-2017-20-4-23-25

Исследование механизмов деградации полупроводниковых структур имеет большое значение для понимания причин ухудшения свойств полупроводниковых приборов при длительных испытаниях. В работе [1] неоднородность инжекции носителей заряда по площади структуры связывают с локальной диффузией и электромиграцией остаточных примесей вдоль дефектных трубок, индуцированными механическими напряжениями, возникающими при формировании электродов. В данной работе мы проводим оценку роли термопластических явлений в расширении дефектных областей вследствие генерации новых дефектов.

Экспериментальная часть

В качестве объекта исследования был выбран светодиод синего свечения с чипом-кристаллом SL-V-B24AD Semileds на основе GaN без люминофора с номинальным током эксплуатации 150 мА. Были проведены визуальные исследования поверхности кристалла, в том числе с ультрафиолетовой (УФ) подсветкой. Получены изображения поверхности кристалла с УФ-подсветкой до и после ускоренных испытаний при повышенных плотностях рабочего тока.

Импульсное УФ-облучение поверхности кристалла получено посредством фотовспышки Canon Speedlight 430 EX II со снятым светофильтром, в конструкции которой имеется ртутная лампа в кварцевом баллоне. Фотографирование поверхности кристалла и картин его фотолюминесценции под действием УФ-облучения производилось с помощью микроскопа МИМ-7 и цифрового фотоаппарата Canon EOS 60D, обладающего большой чувствительностью (100–6400 ISO) и разрешающей способностью (19 мпкс). Затем мы постепенно увеличивали ток испытаний от 50 до 100 мА и когда достигли уровня 100 мА, обнаружили первые потемнения на поверхности кристалла (места образования дефектов). Максимальные линейные размеры потемнений вначале составляли порядка 2 мкм. После испытаний при токе 130 мА дефект, который появился при токе 100 мА, начал расширяться, а на месте второго потемнения стало видно образование нового точечного дефекта. Также вблизи границы кристалла отчетливо виден новый дефект. Таким образом, можно ска-

зать, что при токе 130 мА уже видна явная картина дефектообразования. Также были определены количество дефектов и их площадь, значения которых занесены в табл. 1. Кинетика дальнейшего дефектообразования исследовалась при рабочем токе больше номинального.

Таблица 1

Зависимость количества, диаметра и площади дефектов от величины тока и времени испытаний

№	Величина тока, мА	Время испытания, ч	Количество дефектов	Площадь дефекта, мкм ²	Макс. диаметр, мкм
1	75	6,0	0	0	0
2	100	2,0	2	3,14	2
3	130	3,0	3	120,105	10
4	150	1,5	5	213,52	10
5	170	2,0	12	347,755	10
6	200	0,5	20	909,03	15

Таким образом, экспериментальные исследования картин фотолюминесценции поверхности гетероструктуры с УФ-подсветкой показали, что при испытании при повышенных плотностях тока формируются дефектные области, представляющие собой темные точки и пятна, которые расширяются в процессе деградации. При этом УФ-подсветка приводит к возникновению фотолюминесценции дефектных областей в желто-зеленой области спектра и появлению зеленого ореола вокруг темных пятен [2, 3].

Анализ картин фотолюминесценции показал, что эти темные области представляют собой каналы предпочтительного зарядопереноса, как было описано нами ранее в работе [4]. Безызлучательная рекомбинация и протекание тока по этому каналу приводят к возникновению перегрева, что, в свою очередь, приводит к термическим напряжениям. Наблюдаемый по периметру канала зеленый ореол (при УФ-подсветке) свидетельствует о повышенной плотности дислокаций вблизи канала. В табл. 1 представлены экспериментальные данные, демонстрирующие зависимость площади дефектов, их количества и максимального диаметра от времени испытания и величины рабочего тока.

Как видно из табл. 1, с увеличением рабочего тока выше номинального уже после 10 ч испытаний

наблюдается значительный рост площади дефектов, и при токе 200 мА максимальный радиус некоторых дефектов достигает 7 мкм.

В работе [4] нами было показано, что с увеличением радиуса локального дефекта (шнура) увеличивается температура в центре шнура, и при достижении радиуса 9 мкм перегрев в центре превышает 150 °С, что совпадает с данными [5].

При таком перегреве могут возникать существенные термопластические явления, связанные с расширением вещества в области перегрева [1, 4]. Поэтому мы решили, что в процессе испытаний при неоднородности протекания тока возникают термические напряжения, которые способствуют генерации новых дефектов, что приводит к увеличению размеров дефектных областей.

Далее приведен расчет напряжений, возникающих в центре шнура вследствие перегрева.

Расчет

Для нахождения поля деформаций $u_r(r)$ следует решить уравнение механического равновесия. Для расчета мы использовали модель, опубликованную нами в работе [4]. Воспользуемся готовым решением для изотропного цилиндра [6].

$$u_r(r) = \frac{\alpha}{3} \frac{1+\sigma}{1-\sigma} \left\{ \frac{1}{r} \int_0^r T(\rho) \cdot \rho \cdot d\rho + (1-2\sigma) \frac{r}{R^2} \int_0^R T(\rho) \cdot \rho \cdot d\rho \right\}, \quad (1)$$

где σ – коэффициент Пуассона; R – радиус цилиндра; r – расстояние до точки, в которой оцениваются механические напряжения; $T(\rho)$ – функция зависимости температуры внутри шнура от расстояния до центра; α – температурный коэффициент объемного расширения.

В нашем случае следует сделать предельный переход. Исходя из выражения

$$\delta T(r,t) = \frac{1}{2a} \int_0^t \int_0^\infty \frac{1}{\tau} \cdot e^{-\frac{\rho^2+r^2}{4a\tau}} \cdot \rho \cdot f(\rho) \cdot I_0\left(\frac{2\rho r}{4a\tau}\right) \cdot d\rho \cdot d\tau, \quad (2)$$

можно показать, что при $r \rightarrow \infty$

$$\delta T(r,t) \approx \frac{e^{-r^2/4at}}{r^2} \cdot t.$$

Поскольку t фиксировано, запишем

$$T \approx \frac{A}{r^2} \cdot e^{-\beta r^2}.$$

При данном асимптотическом представлении $T(r)$ интеграл $\int_0^r T(\rho) \cdot \rho \cdot d\rho$ в (1) имеет конечное значение и, следовательно, второе слагаемое в скобках выражения (1) при $R \rightarrow \infty$ обращается в нуль.

Выпишем выражения для тензора деформаций в цилиндрических координатах [6]:

$$\begin{aligned} u_{rr} &= \partial u_r / \partial r; \quad u_{\phi\phi} = r^{-1} \partial u_\phi / \partial \phi + u_r / r; \quad u_{zz} = \partial u_z / \partial z; \\ 2u_{r\phi} &= r^{-1} \partial u_z / \partial \phi + \partial u_\phi / \partial z; \quad 2u_{rz} = \partial u_r / \partial z + \partial u_z / \partial r; \quad (3) \\ 2u_{r\phi} &= \partial u_\phi / \partial r - r^{-1} u_\phi + r^{-1} \partial u_r / \partial \phi. \end{aligned}$$

Полагая в соответствии с условиями задачи $d/d\phi = d/dz = 0$; $u_z + u_\phi = 0$, получим, что отличны от нуля лишь две компоненты тензора: u_{rr} и $u_{\phi\phi}$, причем

$$u_{rr} = \partial u_r / \partial r; \quad u_{\phi\phi} = r^{-1} u_r. \quad (4)$$

Подстановка (1) в (4) дает:

$$u_{rr}(r) = \frac{\alpha}{3} \frac{1+\sigma}{1-\sigma} \cdot [T(r) - P(r)]; \quad u_{\phi\phi}(r) = \frac{\alpha}{3} \frac{1+\sigma}{1-\sigma} \cdot P(r), \quad (5)$$

где $P(r) = \frac{1}{r^2} \int_0^r T(\rho) \rho d\rho$.

Далее запишем выражение для тензора механических напряжений [6]

$$\sigma_{ik} = \frac{\hat{E}}{1+\sigma} \cdot \left(u_{ik} + \frac{\sigma}{1-2\sigma} \cdot u_{ll} \delta_{ik} \right) - \frac{\hat{E} \alpha T}{3(1-2\sigma)} \delta_{ik}, \quad (6)$$

где δ_{ik} – символ Кронеккера; \hat{E} – модуль Юнга.

Из (5) и (6) следует

$$\sigma_{rr}(r,t) = -\frac{\alpha \hat{E}}{3(1-\sigma)} \cdot P(r); \quad \sigma_{\phi\phi} = \frac{\alpha \hat{E}}{3(1-\sigma)} \cdot (P(r) - T(r)). \quad (7)$$

Установление простой связи между компонентами тензора напряжений и температурой возможно лишь для координаты, равной нулю (в центре шнура). Для нахождения величин напряжений, возникающих на оси токового шнура (где они максимальны), разложим интегралы, входящие в (1), в ряд в окрестности $r = 0$

$$\int_0^r T(\rho) \rho d\rho = 0 + 0 \cdot r + \frac{T(0)}{2} r^2 + \dots, \quad (8)$$

откуда $P(0) = T(0)/2$. Таким образом, из (7) следует

$$\sigma_{rr}(0) = \sigma_{\phi\phi}(0) = -\frac{\alpha \hat{E} T(0)}{6(1-\sigma)}, \quad (9)$$

где \hat{E} – модуль Юнга; δT – превышение температуры в центре шнура.

Подставив в формулу (8) справочные значения, получим значения, представленные в табл. 2.

Таблица 2

Зависимость температуры перегрева и напряжения в центре шнура от его радиуса

$R, \text{ м}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-6}$	$7 \cdot 10^{-6}$	$8 \cdot 10^{-6}$	$9 \cdot 10^{-6}$
$T, \text{ К}$	47,5	68,4	93,18	121,7	154,5
$\sigma_{rr}, \text{ Па}$	$7,009 \cdot 10^6$	$1,009 \cdot 10^7$	$1,375 \cdot 10^7$	$1,796 \cdot 10^7$	$2,280 \cdot 10^7$

Обсуждение результатов

Расчет прочности, проведенный по формуле (9), показывает, что напряжение в кристалле нитрида галлия при данных условиях составляет всего около 20 МПа (см. табл. 2), тогда как согласно справочным данным значение предела упругости составляет порядка 100 ГПа. Для генерации новых дислокаций полученного значения недостаточно. Таким образом, возникающие термопластические явления не могут приводить к возникновению новых дислокаций. Однако результаты, полученные в работе [4], показы-

вают, что температура перегрева зависит от радиуса шнура предпочтительного зарядопереноса, который в конечном итоге зависит от размеров кластера дислокаций. А поскольку согласно представленному выше расчету генерация новых дислокаций невозможна, то мы, вероятно, наблюдаем движение (разбегание) дислокаций от области расширения вещества вследствие перегрева за счет термопластических явлений. Как известно [7], силу τ , достаточную для движения дислокаций, можно рассчитать по закону Гука:

$$\tau_{\max} = G \cdot x/b, \quad (10)$$

где τ – сопротивление решетки сдвигу; G – модуль сдвига; x/b – деформация.

При этом экспериментальные значения τ в 10^4 – 10^5 раз меньше максимального значения, которое составляет $G/2\pi$, а также чем больше радиус дислокации, тем меньше сила, необходимая для ее перемещения [7]. А если учитывать, что в гетероструктуре нитрида галлия присутствует большая концентрация начальных дислокаций, которая составляет не менее 10^9 см^{-2} [8], то можно предположить, что такое движение приведет к созданию кластеров с радиусом более 9 мкм. Это может вызывать новые источники перегревов, увеличение концентрации крупных дефектов и их расширение, что и наблюдается в эксперименте.

Заключение

Таким образом, наблюдаемое в экспериментах расширение темных областей связано не с формированием новых дислокаций в области локального перегрева, а с движением множества дислокаций, находящихся вблизи области локального перегрева, и их группированием в кластеры, радиус которых впоследствии может превышать критическое значение и приводить к выходу прибора из строя [4].

Литература

1. Неоднородность инжекции носителей заряда и деградация голубых светодиодов / Н.И. Бочкарева, А.А. Ефремов, Ю.Т. Ребане и др. // Физика и техника полупроводников. – 2006. – Т. 40, № 1. – С. 122–127.
2. Исследование физических свойств объемных монокристаллов нитрида галлия / В.А. Иванцов, В.А. Суховеев, В.И. Николаев и др. // Физика твердого тела. – 1997. – Т. 39, № 5. – С. 858–860.
3. Изменения люминесцентных электрических свойств светодиодов из гетероструктур InGaN/AlGaIn/GaN

при длительной работе / А.Н. Ковалев, Ф.И. Маняхин, В.Е. Кудряшев и др. // Физика и техника полупроводников. – 1999. – Т. 33, вып. 2. – С. 224–232.

4. Еханин С.Г. Оценка локального перегрева в гетероструктуре светоизлучающего диода на основе GaN / С.Г. Еханин, М.Н. Романовский, А.А. Томашевич // Доклады ТУСУРа. – 2012. – № 2 (26), ч. 1. – С. 57–60.

5. Исследование тепловых процессов в мощных InGaIn/GaN флип-чип светодиодах с использованием инфракрасной тепловизионной микроскопии / А.Л. Закгейм, Г.Л. Курьшев, М.Н. Мизеров и др. // Физика и техника полупроводников. – 2010. – Т. 44, вып. 3. – С. 390–396.

6. Ландау Л.Д. Теория упругости. Теоретическая физика / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – Т. 7. – М.: Наука, 1987. – 246 с.

7. Регель В.Р. Кинетическая природа прочности твердых тел / В.Р. Регель, А.И. Слуцкер, Э.Е. Томашевский. – М.: Наука, 1974. – 560 с.

8. Получение слоев GaN с пониженной плотностью дислокаций методом молекулярно-лучевой эпитаксии / А.Н. Алексеев, Д.М. Красовицкий, С.И. Петров, В.П. Чалый // Физика и техника полупроводников. – 2012. – Т. 46, вып. 11. – С. 1460–1462.

Еханин Сергей Георгиевич

Д-р физ.-мат. наук, профессор каф. конструирования узлов и деталей РЭС (КУДР) ТУСУРа
Тел.: +7 (382-2) 51-23-27
Эл. почта: exan@ultranet.tomsk.ru

Томашевич Александр Александрович

Аспирант каф. КУДР
Тел.: +7-923-431-01-81
Эл. почта: tom.alex@mail.ru

Ekhanin S.G., Tomashevich A.A.

Investigation of degradation of GaN based semiconductor structures

This paper contains mechanical strength analysis for GaN based light emitting diode structure. An evaluation of role of thermoplastic deformation in expansion of defect areas in consideration of new defect formation in the GaN based semiconductor heterostructure is carried out.

Keywords: dislocation, gallium nitride, heterostructure, mechanical strength.

УДК 537.525

А.С. Климов, С.А. Останин

Распределение концентрации плазмы в разряде с протяженным полым катодом форвакуумного плазменного источника электронного пучка

Представлены результаты исследования распределения концентрации плазмы в разряде с полым катодом форвакуумного источника ленточного электронного пучка. Исследования проводились в диапазоне давлений, соответствующих форвакууму (10–30 Па). Показано, что изменение геометрии катодной полости, давления и величины разрядного тока в разной степени влияет на характер распределения концентрации плазмы вблизи эмиссионной границы. Формирование однородного распределения возможно при использовании относительно широкой и глубокой катодной полости. Уменьшение глубины катодной полости приводит к появлению максимумов концентрации плазмы вблизи краев полости. На основе экспериментальных данных предложена качественная модель, описывающая физические процессы образования и гибели частиц в исследуемом разряде с протяженным полым катодом.

Ключевые слова: плазменный электронный источник, тлеющий разряд, распределение концентрации, форвакуумная область давлений.

doi: 10.21293/1818-0442-2017-20-4-26-29

Источники ленточных электронных пучков применяются в различных технологических процессах термического и плазмохимического воздействия на материалы, включая электронно-лучевую обработку поверхности, плазмохимические реакции, травление тонкого монослоя потоками частиц из создаваемой электронным пучком плазмы [1–5]. Один из способов формирования электронного пучка ленточной конфигурации основан на использовании эмиссии из тлеющего разряда в протяженном полой катод [6]. Традиционная область давлений, в которой функционируют источники электронов с плазменным катодом, находится в диапазоне 10^{-3} –0,1 Па [7]. Однако наиболее оптимальный, с точки зрения получения плотной пучковой плазмы, диапазон давлений газа на несколько порядков выше 1–100 Па [8], что соответствует среднему вакууму или форвакууму, для получения которого используются лишь механические системы откачки – форвакуумные насосы. Электронные источники, способные генерировать электронные пучки при таких давлениях, получили название форвакуумных [9].

Одним из преимуществ источников электронов с плазменным катодом по сравнению с термокатодными источниками является возможность генерации электронных пучков большого сечения [10, 11], к которым относятся и пучки ленточной конфигурации, т.е. электронные пучки с поперечным сечением, представляющим собой прямоугольник с толщиной много меньше ширины.

Одним из параметров, определяющих эффективность электронно-лучевой обработки, является однородность плотности тока по сечению пучка. Для пучков ленточной конфигурации этот параметр является одним из важных, поскольку именно от равномерности плотности тока зависят равномерность обработки самим пучком, а также равномерность создаваемой пучковой плазмы. При этом равномерность распределения плотности тока пучка

зависит от двух параметров – однородности распределения плазмы вблизи эмиссионной границы и распределения электрического поля в ускоряющем промежутке. На однородность эмиссионной плазмы в свою очередь могут оказывать влияние параметры разряда, геометрия катодной полости и давление газа [12–14].

Цель настоящей работы заключалась в определении наиболее существенных параметров, влияющих на равномерность распределения концентрации плазмы вблизи эмиссионной границы.

Экспериментальная установка

Исследование проводилось с использованием макета форвакуумного плазменного электронного источника, основанного на разряде с протяженным полым катодом. Электронный источник представлял собой трехэлектродную систему (рис. 1).

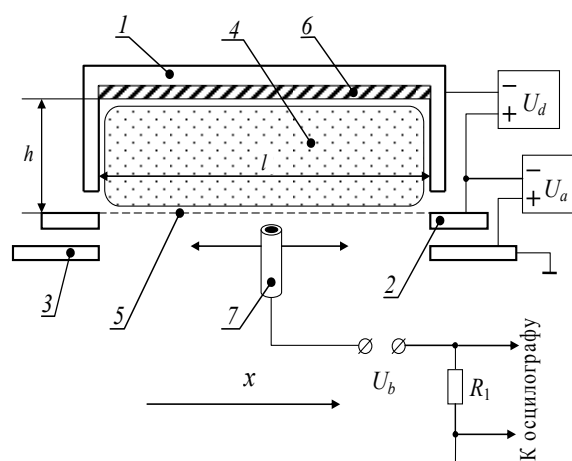


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 – полой катод; 2 – анод; 3 – экстрактор; 4 – плазма; 5 – эмиссионная сетка; 6 – вкладыш; 7 – перемещаемый зонд

Основными электродами источника являлись протяженный прямоугольный полой катод 1, плоский анод 2 и ускоряющий электрод – экстрактор 3.

Разряд с полым катодом, зажигаемый между плоским анодом и протяженным полым катодом, служил генератором плазмы 4. Внутренние размеры катодной полости составляли $280 \times 60 \times 30$ мм³. Расстояние катод–анод во всех экспериментах устанавливалось равным 5 мм. Извлечение электронов осуществлялось через протяженное эмиссионное окно в аноде, перекрытое мелкоструктурной вольфрамовой сеткой 5 с прозрачностью 80%. Эмиссионное окно представляло собой протяженную щель с размерами 280×10 мм². Использование вольфрама в качестве материала сетки позволяло работать при повышенных давлениях и в условиях интенсивного нагрева сетки обратным ионным потоком из ускоряющего промежутка источника. Все электроды источника изготавливались из нержавеющей стали. Конструкция ускоряющего промежутка источника обеспечивала сохранение электрической прочности и работоспособности источника вплоть до давлений 30 Па при ускоряющем напряжении до 10 кВ.

Медные вкладыши 6 позволяли изменять внутреннюю геометрию катодной полости, в частности глубину h полого катода, от 60 до 24 мм.

Измерение концентрации n плазмы в катодной полости производилось перемещаемым одиночным лэнгмюровским зондом 7 по ионному току насыщения [15]. Обработка зондовой характеристики осуществлялась по стандартной методике. Зонд устанавливался за эмиссионной сеткой со стороны ускоряющего промежутка на устройстве перемещения, что позволяло двигать его вдоль протяженного размера катодной полости. Расположение зонда непосредственно в катодной полости, т.е. при снятой эмиссионной сетке, приводило к возмущению плазмы разряда. В связи с этим измерения концентрации плазмы проводились вне разрядной ячейки в непосредственной близости к эмиссионной сетке.

Ионы, подлетающие к эмиссионной сетке, пролетают сквозь ее ячейки и попадают на приемную поверхность зонда. За счет рассеяния часть ионов теряется, однако это не может сказаться на характере распределения концентрации вдоль катодной полости. Специальные измерения концентрации плазмы, проведенные непосредственно в катодной полости, и сравнение с измерениями за эмиссионной сеткой показали, что потери ионов составляют не более 10–20% во всем диапазоне варьируемых параметров. Отрицательное смещение на зонд подавалось от источника стабилизированного напряжения порядка 20 В. Ток зонда определялся с помощью осциллографа Tektronix TPS2024B по величине падения напряжения на измерительном резисторе R_1 номиналом 10 кОм. Измерения проводились в атмосфере аргона при давлениях 12,5; 17,5 и 26 Па.

Результаты работы и их анализ

Исследования показали, что на характер распределения концентрации плазмы оказывают влияние давление газа, величина разрядного тока, а также геометрия катодной полости. Уменьшение глубины полости неизменно нарушало однородность распределения концентрации плазмы – концентрация на

краях полости в несколько раз превышала концентрацию в ее средней части. С уменьшением глубины и ростом давления газа разница между концентрацией на краю и средней частью только увеличивалась (рис. 2, 3).

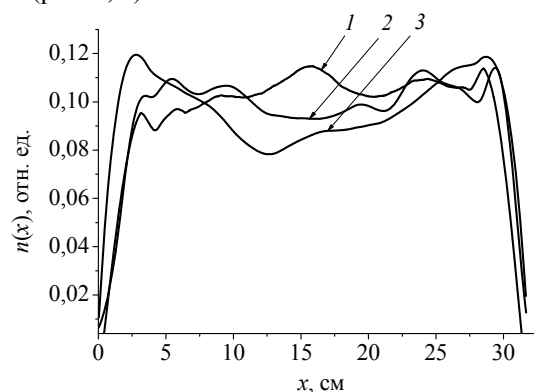


Рис. 2. Распределение концентрации плазмы вдоль протяженного размера катодной полости при давлении 12 Па, токе разряда 200 мА. Глубина полости: 1 – 60 мм, 2 – 54,5 мм, 3 – 48 мм

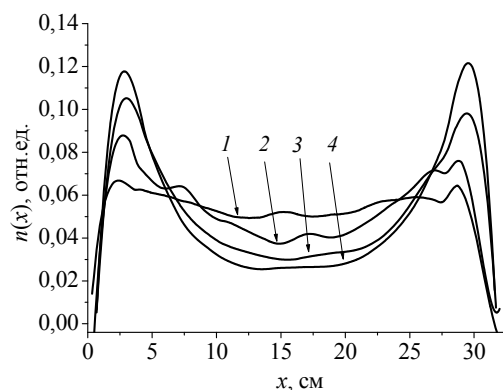


Рис. 3. Распределение концентрации плазмы вдоль протяженного размера катодной полости при давлении 26 Па, токе разряда 200 мА. Глубина полости: 1 – 60 мм, 2 – 54,5 мм, 3 – 36 мм, 4 – 24 мм

Объяснение полученных результатов может быть дано на основе учета процессов генерации и ухода частиц из плазмы газового разряда. Как известно, в тлеющем разряде основными механизмами рождения заряженных частиц – ионов и электронов является ионизация газа, причем в ионизации участвуют как сами плазменные электроны, так и электроны, рождаемые за счет вторичной ион-электронной эмиссии со стенок катодной полости. При повышенных давлениях форвакуумного диапазона длина свободного пробега электронов в атмосфере аргона составляет несколько сантиметров, и ионизация нейтральных атомов вторичными электронами происходит в основном вблизи торцевых стенок полости. Это и может служить объяснением повышения концентрации плазмы вблизи торцевых стенок катодной полости в случае работы в атмосфере аргона при повышении давления.

Указанный механизм образования неоднородности был положен в основу полуколичественной модели процессов в плазме разряда с протяженным полым катодом. Измерения показали, что в попереч-

ном сечении катодной полости плазма более однородна, чем в продольном (вдоль оси x), это позволило существенно упростить расчет и перейти к одномерной модели, учитывающей изменение концентрации n и потенциала плазмы ϕ только вдоль одной координаты x . При построении модели учитывалось, что движение заряженных частиц в плазме происходит за счет дрейфа и диффузии, плазма положительна относительно анода, электроны покидают плазму за счет теплового движения с учетом потенциально-го барьера между ней и анодом, рождение ионов и электронов происходит за счет ионизации молекул газа как плазменными, так и вторичными электронами.

При построении модели был использован подход, описанный в [16]: записывались уравнения непрерывности для потоков ионов и электронов, а также выражения для самих потоков. Дополнительно учитывалось рождение заряженных частиц за счет ион-электронной эмиссии со стенок катодной полости, а также размеры самой полости. Уравнения непрерывности для потоков ионов j_i и электронов j_e , таким образом, представляли собой:

$$\operatorname{div} j_i = W_p + W_\gamma - Z_i, \quad (1)$$

$$\operatorname{div} j_e = W_p + W_\gamma + W_{\gamma s} - Z_e, \quad (2)$$

где W_p , W_γ , $W_{\gamma s}$ – слагаемые, учитывающие рождение заряженных частиц за счет ионизации газа плазменными электронами, γ -электронами, а также вклад самих γ -электронов соответственно $1/(\text{м}\cdot\text{с})$; Z_i и Z_e – скорость исчезновения заряженных частиц, $1/(\text{м}\cdot\text{с})$.

С учетом процессов диффузии и дрейфа заряженных частиц выражения для потоков могут быть представлены как

$$j_i = -D_i \cdot \frac{dn}{dx} \cdot S - \mu_i \cdot \frac{d\phi}{dx} \cdot n \cdot S, \quad (3)$$

$$j_e = -D_e \cdot \frac{dn}{dx} \cdot S + \mu_e \cdot \frac{d\phi}{dx} \cdot n \cdot S, \quad (4)$$

где μ_i , μ_e , D_i , D_e – подвижности и коэффициенты диффузии ионов и электронов соответственно; $S = h \cdot l$ – площадь сечения плазмы, м^2 .

Скорости рождения частиц W_p , W_γ , $W_{\gamma s}$ могут быть представлены:

$$W_p = \beta \cdot n \cdot S, \quad (5)$$

где β – выход ионизации плазменными электронами, $1/\text{с}$.

$$W_\gamma = 0,4 \frac{\phi}{U_i} \gamma n \sqrt{\frac{kT_e}{M_i}} \cdot S, \quad (6)$$

где γ – коэффициент ионно-электронной эмиссии; M_i – масса иона, кг,

$$W_{\gamma s} = 0,4 \gamma n \sqrt{\frac{kT_e}{M_i}} \cdot (2a + b - 4l_s), \quad (7)$$

$$Z_i = 0,4 n \sqrt{\frac{kT_e}{M_i}} \cdot (2a + b - 4l_s), \quad (8)$$

$$Z_e = \frac{1}{4} n \sqrt{\frac{8kT_e}{\pi m_e}} \cdot \exp\left(-\frac{\Delta\phi}{kT_e}\right) \cdot (b - 2l_s), \quad (9)$$

где $\Delta\phi$ – разность потенциалов плазма-анод, В.

Продольная координата x отсчитывалась от середины полости. Для решения системы уравнений начальное значение концентрации бралось из эксперимента и составляло порядка $1,2 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3}$, в предположении симметрии задачи значение первой производной концентрации в начальной точке устанавливалось равным нулю. Сечение ионизации, подвижности, а также другие константы были взяты из [17]. Система уравнений (1)–(4) решалась численными методами: значения концентрации, потенциала плазмы, а также величины потоков рассчитывались пошагово для данного значения координаты. В результате решения были получены распределения концентрации плазмы, представленные на рис. 4 и 5.

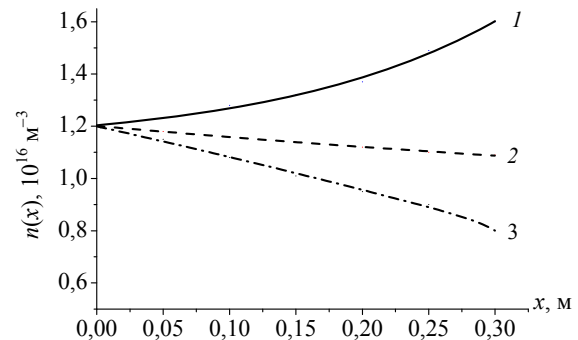


Рис. 4. Расчетные распределения концентрации плазмы вдоль протяженного размера катодной полости при давлении 12 Па, токе разряда 200 мА.

Глубина полости: 1 – 23 мм, 2 – 24 мм, 3 – 25 мм

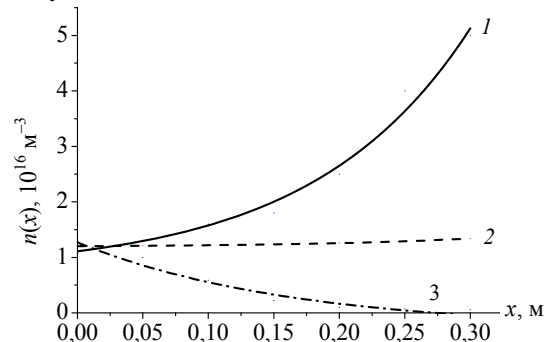


Рис. 5. Расчетные распределения концентрации плазмы вдоль протяженного размера катодной полости при давлении 26 Па, токе разряда 200 мА.

Глубина полости: 1 – 23 мм, 2 – 24 мм, 3 – 25 мм

Представленные на рис. 4, 5 расчетные кривые $n(x)$ для разных глубин катодной полости находят в качественном соответствии с экспериментальными результатами, представленными на рис. 2, 3. Однако в расчетных результатах наблюдается более резкая зависимость концентрации плазмы от размеров катодной полости, в частности ее глубины h . Так, изменение глубины на несколько миллиметров вызывает резкое изменение в характере распределения концентрации плазмы – от максимума в средней части до появления максимумов вблизи ее торцов. Такое поведение расчетной зависимости скорее всего связано с простотой расчетной модели, не учитывающей изменение концентрации в поперечном сечении полости. Тем не менее расчетные зависимости отражают тенденции, наблюдаемые эксперимен-

тально: уменьшение глубины полости приводит к росту концентрации вблизи торцевых стенок катода; рост давления способствует более существенному росту концентрации вблизи торцов полости.

Проведенные расчеты подтверждают сформулированные соображения относительно физического механизма формирования распределения $n(x)$ в разряде с протяженным полым катодом. С уменьшением глубины полости характер распределения меняется – концентрация плазмы повышается вблизи торцевых стенок катодной полости и существенно зависит от давления газа – рост давления приводит к более существенному росту концентрации.

Заключение

Распределение концентрации плазмы в полном катоде форвакуумного источника ленточного электронного пучка в диапазоне давлений 10–30 Па в значительной степени зависит от геометрии катодной полости и давления газа. Наиболее равномерное распределение концентрации плазмы во всем исследуемом диапазоне давлений наблюдается в случае достаточно глубокой полости, когда длина свободного пробега электронов превышает глубину в несколько раз. Определены параметры геометрии полости, при которых удается получать равномерное распределение концентрации плазмы.

Работа поддержана Министерством образования и науки в рамках базовой части проекта № 3.9605.2017/8.9.

Литература

1. Atomic fluorine densities in electron beam generated plasmas: A high ion to radical ratio source for etching with atomic level precision / D.R. Boris, T.B. Petrova, G.M. Petrov, S.G. Walton // *J. Vac. Sci. Technol.* – 2017. – Vol. A35. – P. 01A104.
2. Leonhardt D. Applications of Electron-Beam Generated Plasmas to Materials Processing / D. Leonhardt, C. Muratore, S.G. Walton // *IEEE Trans. on Plasma Science.* – 2005. – Vol. 33, No. 2. – P. 783.
3. Vasilieva T.M. Application of electron beam plasma for biopolymers modification // *Journal of Physics: Conference Series.* – 2012. – Vol. 370. – P. 012012.
4. Agarwal A. Plasma atomic layer etching using conventional plasma equipment / A. Agarwal, M. J. Kushner // *J. Vac. Sci. Technol.* – 2009. – Vol. A27. – P. 37.
5. Electron Beam Generated Plasmas for Ultra Low Te Processing / S.G. Walton, D.R. Boris, S.C. Hernández et al. // *J. Solid State Sci. Technol.* – 2015. – Vol. 4, No. 6. – P. 5033–5040.
6. Окс Е.М. Источники электронов с плазменным катодом: физика, техника, применения. – Томск: Изд-во НТЛ, 2005. – 156 с. (пер. на англ. язык: Oks E.M. Plasma Cathode Electron Sources – Physics, Technology, Applications. – N.Y.: WILEY-VCH, 2006. – 172 p.).
7. Бугаев С.П. Электронные пучки большого сечения / С.П. Бугаев, Ю.Е. Крейндел, П.М. Щанин. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 112 с.
8. Production of large-area plasmas by electron beams / R.F. Fernsler, W.M. Manheimer, R.A. Meger et al. // *Physics of Plasmas.* – 1998. – Vol. 5, No. 5. – P. 2137.
9. Форвакуумные плазменные источники электронов / В.А. Бурдовицин, А.С. Климов, А.В. Медовник и др. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2014. – 288 с.

10. Электронный источник с плазменным катодом для генерации ленточного пучка в форвакуумном диапазоне давлений / В.А. Бурдовицин, Ю.А. Бурачевский, Е.М. Окс, М.В. Федоров // *Приборы и техника эксперимента.* – 2003. – № 2. – С. 127–129.

11. Бурдовицин В.А. Параметры «плазменного листа», генерируемого ленточным электронным пучком в форвакуумной области давлений / В.А. Бурдовицин, Е.М. Окс, М.В. Федоров // *Изв. вузов. Физика.* – 2004. – № 3. – С. 74–77.

12. Гаврилов Н.В. Генерация однородной плазмы в тлеющем разряде с полым анодом и широкоапертурным полым катодом / Н.В. Гаврилов, Д.Р. Емлин, С.П. Никулин // *Письма в ЖТФ.* – 1999. – Т. 25, № 12. – С. 83–88.

13. Никулин С.П. Генерация однородной плазмы и широких ионных пучков в пеннинговской системе с неэквивалентным полым катодом / С.П. Никулин, Д.Ф. Чичигин, П.В. Третников // *ЖТФ.* – 2004. – Т. 74, № 9. – С. 39–42.

14. Мартенс В.Я. Управление распределением плотности тока по поверхности плазменного эмиттера большой площади / В.Я. Мартенс, Е.Ф. Шевченко // *Письма в ЖТФ.* – 2011. – Т. 37, № 8. – С. 71–78.

15. Чен Ф. Диагностика плазмы / Ф. Чен; под ред. Р. Хаддлстоуна, С. Леонарда. – М.: Мир, 1967. – 515 с.

16. Климов А.С. Тлеющий разряд с неоднородным полым катодом для форвакуумных плазменных источников электронов / А.С. Климов, Ю.А. Бурачевский, И.С. Жирков // *Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники.* – 2008. – 2(18), ч. 2. – С. 53–58.

17. Левитский, С.М. Сборник задач и расчетов по физической электронике / С.М. Левитский. – Киев: Изд-во Киевского ун-та, 1964. – 212 с.

Климов Александр Сергеевич

Д-р техн. наук, доцент каф. физики ТУСУРА
Тел.: +7-905-990-52-41
Эл. почта: klimov@main.tusur.ru

Останин Сергей Александрович

Студент каф. физической электроники ТУСУРА
Тел.: +7-913-109-73-28
Эл. почта: super_gaara@mail.ru

Klimov A.S., Ostanin S.A.

Plasma density distribution in the discharge with an extended hollow cathode of the fore-vacuum plasma electron source

The article presents the results of an investigation of the plasma density distribution in a hollow cathode discharge of a ribbon electron beam source. The investigations were carried out in the forvacuum pressure range (10–30 Pa). It is shown that the change in the geometry of the cathode cavity, pressure, and magnitude of the discharge current affects the character of the distribution of the plasma density near the emission boundary. Formation of a homogeneous distribution is possible using a relatively wide and deep cathode cavity. A decrease in the depth of the cathode cavity leads to the appearance of plasma density maxima near the edges of the cavity. A model describing the ionization and current transfer processes occurring in the discharge system under investigation is proposed.

Keywords: plasma electron source, glow discharge, concentration distribution, forvacuum pressure range.

УДК 532.217

E.I. Trenkal, A.G. Loshchilov

A breadboard model of the measuring probe of a new type for the measurement of multiphase environments levels

The paper presents the results of experimental research of a measuring probe of a new type containing variable localized loads. The microwave diodes HSMS-8202 have been used as the variable loads. The reflectograms of responses for the different control voltages are presented. The obtained results show that microwave diodes can be used as variable loads for implementation of the proposed measuring probe.

Keywords: level measurement, TDR, method, measuring probe, variable load.

doi: 10.21293/1818-0442-2017-20-4-30-32

One of the standard processes of modern industry is the measurement of contents in containers and tanks. Moreover, the content may be a combination including several environments with a layered structure and different properties. In the presence of a multilayer structure in a tank, an important task is to analyze this structure including determination of the number of layers and locations of layers' boundaries. An example is the task of monitoring layer-by-layer composition of liquids at the stage of oil-product clearing, which requires the determination of the oil, the bottom water and the emulsion layers.

The solution of such task is possible with the use of a limited number of methods. One of such methods is the time domain reflectometry (TDR) [1–5]. The article [5] contains a detailed overview and analysis of existing papers describing application of the method in the multiphase liquid measurement area.

In TDR the level location is determined based on the delay of the pulse signals reflected from the phase boundaries (responses). The response delay depends on the layer length and the signal propagation velocity, which, in turn, depends on the environment properties. The determination of the signal propagation velocity in each layer is quite a difficult task. In most existing technical solutions the determination of the signal propagation velocity is based on the use of: 1) the reference data about the measured environments; 2) the data received during a calibration procedure. However, the used data may not correspond to reality at the time of measurement, which can lead to a significant error [6].

Thus, a relevant task is to find an approach which can determine the multiphase liquid layers' properties in real time. It must allow us to determine the signal propagation velocities in the layers with high accuracy, thus increasing measurement reliability and precision.

Proposed solution

The task can be solved by the method proposed in the work [6], the base of which is the use of a special design of the measuring probe including so-called artificial discontinuities – the variable loads. It is worth mentioning that their localization along the probe is known in advance and their properties can be changed at the right time. In Fig. 1 the model of the proposed solution is shown.

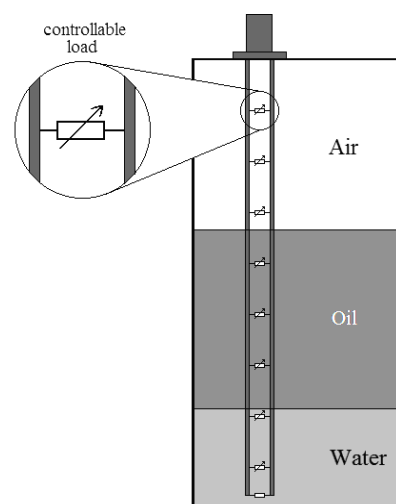


Fig. 1. Model of the measuring probe with variable loads

The advantage of the proposed design is that during the measurement it is possible to purposefully change the reflectogram of a researched object due to the change of the variable loads properties. It means that a reflectogram, in some way, is an extensional view of a measuring probe immersed in the researched environment, where the change of properties of an artificial discontinuity will allow us to localize the response from this discontinuity. As a result, the presence of such «reference» points on the reflectogram provides ample opportunities for research and analysis of the received data.

The procedure includes two operating modes:

1) *calibration mode*, where the condition of the variable loads is successively changed and the parameters of the investigated environments are determined;

2) *measurement mode*, where the multiphase liquid levels are determined based on the data received during the calibration mode.

The detailed description of the operation algorithm and its modeling are shown in [6]. It is worth mentioning that the article describes the ideal case, in which the properties of such variable load can be changed independently and within limits from the ideal matching with the transmission line to the full signal reflection mode.

In practice achievement of even approximate characteristics is quite a difficult task. Thus, it is expedient

to designate the conditions that are instrumental to provide the described above functionality of a measuring probe:

- 1) in the measurement mode the influence of the variable loads on signal propagation should be minimal;
- 2) in the calibration mode it should be possible to identify responses from the variable loads, i.e. each response from the variable load on the reflectogram must be related to the variable load from which this response is reflected.

Experimental research

The purpose of this experimental research was to evaluate the possibility of using microwave diodes as the variable loads.

The control signal (the signal used to change the properties of the variable loads) in this case is a constant voltage (offset voltage), and its modification leads to a change in the state of the microwave diode. A clear advantage of this solution is the ability to control the parameters of the loads using the same line which is used for signal transmission, i.e. additional conductors are not used.

In Fig. 2 you can see the experimental setup layout including the following parts:

- pulse generator;
- sampling oscilloscope;
- z-matched pickoff tee;
- bias tee;
- variable TDR probe (VTDR Probe).

To obtain the test signal, the generator Geozondas GZ1105DLP2, the pulse shaper GZ1117DN-35 and attenuators were used. This set provided an amplitude of the output signal less than 1 V and duration about 40 ps. The generated signal was fed through the z-matched pickoff tee Picosecond 5372 to a sampling oscilloscope DSA 8300 and to the researched object connected through a bias tee Picosecond 5545, which was used to add the offset voltage.

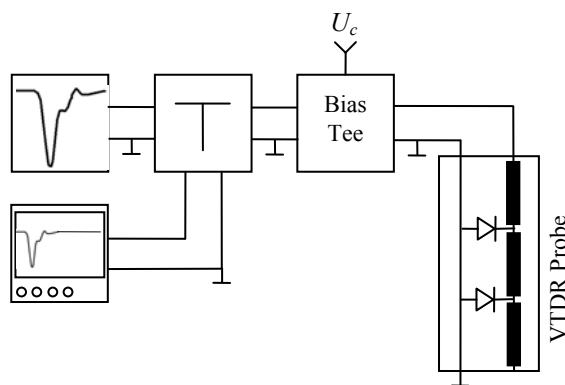


Fig. 2. Experimental setup layout

To analyze the control modes of pulse responses, a fragment of the measuring probe performed as a section of a coplanar waveguide including a microwave diode HSMS-8202 was made. The cathode of the diode was connected to the signal conductor, the anode – to the earth conductor. A negative pulse signal with different offset voltages (0, 1 and 2 V) was applied to the input of the probe.

In Fig. 3 the responses from the diode with different offset voltages are shown.

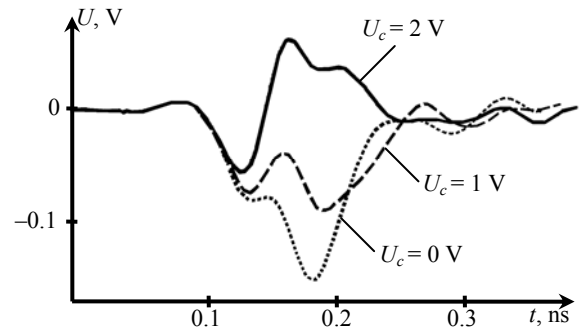


Fig. 3. Responses from the microwave diode with different offset voltages

In the case of the offset voltage absence ($U_c = 0$ V), the diode switches to the open state, that leads to a response with an amplitude of about 0.15 V. If there is a small positive offset voltage ($U_c = 1$ V), the diode switches to the open state only in part. With a further increase of the voltage ($U_c = 2$ V), the diode remains in the close state. The response in the close state is explained by the parasitic parameters of the microwave diode.

Figure 4 depicts the photo of the transmission line with the variable loads, placed at the distance 60 mm and 220 mm from the entrance of the line. The length of the line is 280 mm.



Fig. 4. Photo of the transmission line with two controllable loads

Figure 5 depicts the reflectogram of the described transmission line with the offset voltage $U_c = 0$ V (dashed curve) and $U_c = 2$ V (solid curve).

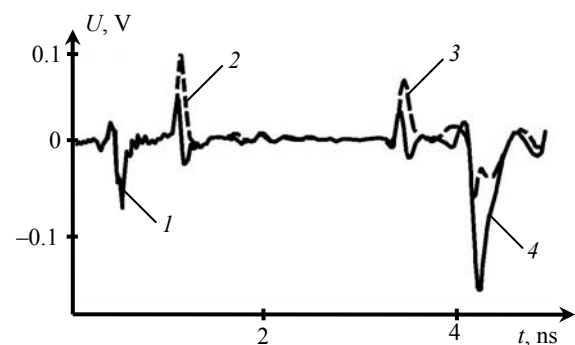


Fig. 5. Reflectogram of the transmission line with two variable loads

On the reflectogram (Fig. 5) the following signals can be defined: the response from the entrance of the line (pos. 1); the responses from the first (pos. 2) and the second (pos. 3) variable loads; the response from the end of the line (pos. 4).

Figure 6 shows the reflectogram of the VTDR breadboard model, which was partially immersed in a liquid. The distance from the transmission line entrance to the phase boundary air-liquid was about 180 mm. The dashed curve corresponds to the mode without offset, the solid curve – to 2 V offset voltage.

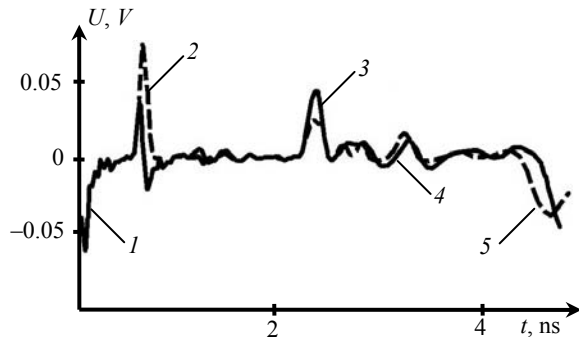


Fig. 6. Reflectogram of the partially immersed transmission line with two controllable loads, where 1 – response from the entrance of the line; 2, 4 – responses from the first and the second diodes; 3 – response from the phase boundary air-liquid; 5 – response from the end of the line

It is clearly seen that the offset voltage rise leads to a decrease of the response amplitude from the controllable loads, which results in an increase of the response amplitude from the air-water phase boundary and the end of the line. This fact may serve as a criterion for identification of the responses from the controllable loads. It should also be noted that the high reflection coefficient from the air-liquid boundary leads to a decrease of the amplitude of the response from the second diode.

Conclusion

The paper describes the results of prototyping the measuring probe containing variable loads, represented by microwave diodes. The reflectograms of responses from the diodes with the different control voltages are presented. The obtained results show that microwave diodes can be used as variable loads for implementation of the proposed measuring probe. The variable TDR probe with the discontinuities, which are made as microwave diodes, can be used for automatic determination of layers' parameters in the process of measurement. Advantages of this solution are the absence of additional lines for the transmission of the control signal and the simplicity and low cost of the implementation.

References

1. Harney W.J. Electromagnetic level indicating (EMLI) system using time domain reflectometry / W.J. Harney, C.P. Nemarich // OCEANS '83, Proceedings. – 1983. – P. 233–236.
2. Nemarich C.P. Time domain reflectometry liquid level sensors // IEEE Instrumentation & Measurement Magazine. – 2001. – Vol. 4. – P. 40–44.

3. Gerding M. Precision level measurement based on time-domain reflection (TDR) measurements / M. Gerding, T. Musch, B. Schiek // Advances in Radio Science. – 2002. – P. 27–31.

4. Cataldo A. Remote sensing of liquid characteristics using Time Domain Reflectometry / A. Cataldo, A. Lay-Ekuakille, C. De Carlo // Proceedings of the SPIE. – 2002. – Vol. 4814. – P. 465–473.

5. Trenkal E.I. Izmerenie urovnej zhidkosti metodom impul'snoj reflektometrii (obzor) [The measurement of liquid's levels using TDR method (overview)] / E.I. Trenkal, A.G. Loshchilov // Proceedings of TUSUR University. – 2016. – Vol. 19, No. 4. – P. 67–73. (in Russian)

6. Trenkal E.I. New approach for increasing the precision of TDR analysis of multilayer environments / E.I. Trenkal, A.G. Loshchilov // Proceedings of TUSUR University. – 2016. – Vol. 19, No. 4. – P. 5–9.

Trenkal E.I.

Postgraduate student of the chair of design of radio electronic components in Tomsk state university of control system and radioelectronics (TUSUR)
Phone: +7-913-816-57-16
E-mail: trenkal@mail.ru

Loshchilov A.G.

Ph.D., the head of the chair of design of radio electronic components in Tomsk state university of control system and radioelectronics (TUSUR),
the head of special design bureau «Smena»
Phone: +7-906-947-69-20
E-mail: yogl@mail.ru

Тренкаль Е.И., Лошилов А.Г.

Макет измерительного зонда нового типа для измерения уровней многослойных сред

Представлены результаты макетирования измерительного зонда нового типа, содержащего управляемые сосредоточенные включения. В качестве включений использовались СВЧ-диоды HSMS-8202. Приведены рефлектограммы откликов от включений при различных управляющих напряжениях. Полученные результаты показывают, что СВЧ-диоды могут использоваться в качестве управляемых включений для реализации предложенного измерительного зонда.

Ключевые слова: измерение уровня, TDR, метод, измерительный зонд, управляемое включение.

Тренкаль Евгений Игоревич

Аспирант каф. конструирования узлов и деталей РЭА (КУДР) ТУСУРа
Тел.: +7 (913) 816-57-16
Эл. почта: trenkal@mail.ru

Лошилов Антон Геннадьевич

Канд. техн. наук, зав. каф. КУДР, начальник СКБ «Смена»
Тел.: +7-906-947-69-20
Эл. почта: yogl@mail.ru

УДК 621.396.

П.П. Гейко, С.С. Смирнов

Анализ содержания оксидов галогенов в атмосфере методом дифференциальной оптической спектроскопии в УФ-области спектра

Метод дифференциальной оптической абсорбционной спектроскопии является эффективным средством для трассовых измерений концентраций атмосферных и примесных газов. В газоанализаторах на его основе традиционно в качестве источника излучения используется ксеноновая лампа высокого давления, требующая высоковольтного питания, что делает такого рода газоанализаторы громоздкими и энергозависимыми. Благодаря последним достижениям в области создания ультрафиолетовых светодиодов и технологии оптических волокон удалось создать макет портативного энергонезависимого газоанализатора. Газоанализатор включает в себя два ультрафиолетовых светодиода, излучающих в ближней УФ-области спектра, систему световодов, приемопередающий телескоп, спектрометр и систему обработки. В статье приводятся описание методики и результаты измерений оксидов хлора и брома с помощью газоанализатора на основе ультрафиолетовых LED-диодов.

Ключевые слова: дифференциальная оптическая спектроскопия, сечение поглощения, ультрафиолетовые светодиоды, оксид хлора, оксид брома.

doi: 10.21293/1818-0442-2017-20-4-33-38

Интерес к дистанционному контролю содержания оксидов галогенов в воздухе обусловлен многочисленными приложениями, в частности, быстро развивающейся в последние годы химией энергоёмких соединений. Энергоёмкие вещества могут отдавать энергию практически мгновенно, например в камере сгорания реактивного двигателя, или с регулируемой скоростью, например в химических источниках тока. Эти соединения играют важную роль в вулканологии и экологии. Основными газами, выбрасываемыми из вулканического жерла, являются водяной пар, CO_2 , SO_2 , H_2S и галогениды водорода, оксиды хлора и брома. Состав выбрасываемых из вулканического жерла газов содержит информацию о магме, ее давлении и температуре.

Среди разработок аппаратуры дистанционного газоанализа лидирующее положение занимают оптические методы контроля. Одним из наиболее перспективных оптических методов является метод дифференциальной оптической абсорбционной спектроскопии (ДОАС) [1].

Перечислим основные достоинства ДОАС-метода. Во-первых, он позволяет проводить измерения концентраций большого числа газов в режиме реального масштаба времени без предварительных и пост-процессов. Здесь под пост-процессами понимаются предварительные операции с исследуемыми пробами. Во-вторых, ДОАС-газоанализаторы способны измерять средние концентрации на атмосферной трассе протяженностью до нескольких километров и в принципе позволяют создать трехмерную карту загрязнения. Наконец, метод ДОАС разделяет преимущества большинства других спектроскопических методов, включая высокую чувствительность вплоть до нескольких ppt (триллионных долей). Кроме того, существует потенциальная возможность измерять распределенные значения концентрации и даже строить 2D- и 3D-карты загрязнений, однако это потребует нескольких контр-

отражателей, установленных в требуемых участках, автоматизированной системы сканирования приемопередающего устройства.

Цель настоящей работы – изучение возможностей практической реализации метода ДОАС для определения концентрации некоторых оксидов галогенов с помощью разработанного трассового газоанализатора на основе УФ-светодиодов.

Описание методики. Рассмотрим методические особенности измерений концентрации газов широкополосным источником излучения. С развитием вычислительной техники традиционный метод дифференциального поглощения существенно видоизменился, для идентификации и определения концентраций газовых загрязнителей вместо двух линий «в» и «вне» полосы поглощения стала возможной работа с большим количеством оцифрованных спектральных компонент. Обработка полученного спектра состоит в удалении спектра поглощения трассы и сравнении остаточного спектра с индивидуальными спектрами поглощения интересующих газов на основе процедур статистических испытаний. Подобная методика позволяет идентифицировать одновременно уже десятки и более веществ, повысить аппаратное быстродействие, обеспечить высокую точность результатов.

Математически интенсивность принятого излучения на заданной длине волны описывается уравнением [1]

$$I(\lambda) = A(\lambda) I_0(\lambda) \times \exp \left\{ -L \left(\sum_{j=1}^J \sigma_j(\lambda) C_j + \sigma_{\text{Mie}}(\lambda) C_{\text{Mie}} + \sigma_{\text{Ray}}(\lambda) C_{\text{Ray}} \right) \right\}, \quad (1)$$

где $A(\lambda)$ – коэффициент пропускания оптической системы; $I_0(\lambda)$ – исходная интенсивность; $\sigma_j(\lambda)$ – сечение селективного поглощения газами $\sigma_{\text{Mie}}(\lambda)$; $\sigma_{\text{Ray}}(\lambda)$ – сечения рассеяния Ми и Рэлея соответ-

венно; C_j – концентрация j -го газа; J – число измеряемых газов; C_{Mie} , C_{Ray} – концентрации аэрозольных и молекулярных рассеивателей. Введем коэффициенты ослабления за счет рассеяния Ми $\varepsilon_{\text{Mie}}(\lambda) = \sigma_{\text{Mie}}(\lambda)C_{\text{Mie}}$ и Рэлея $\varepsilon_{\text{Ray}}(\lambda) = \sigma_{\text{Ray}}(\lambda)C_{\text{Ray}}$ соответственно.

Эффективность рассеяния Рэлея и Ми изменяется плавно с длиной волны, их спектральные зависимости можно представить в виде полинома малого порядка. Поперечное сечение поглощения газами может быть разделено на высокочастотную (дифференциальную) и низкочастотную части

$$\sigma_j(\lambda) = \sigma'_j(\lambda) + \sigma_{j0}(\lambda), \quad (2)$$

где $\sigma_{j0}(\lambda), \sigma'_j(\lambda)$ – низкочастотная и высокочастотная части соответственно.

Подставим выражение (2) в формулу (1), получим

$$I(\lambda) = A(\lambda) \cdot I_0(\lambda) \cdot \exp\left\{-L \sum_{j=1}^J \sigma'_j(\lambda) C_j\right\} \times \exp\left\{-L \left(\sum_{j=1}^J \sigma_{j0}(\lambda) C_j + \varepsilon_{\text{Ray}}(\lambda) + \varepsilon_{\text{Mie}}(\lambda)\right)\right\}. \quad (3)$$

Введем интенсивность

$$I'_0(\lambda) = A(\lambda) \cdot I_0(\lambda) \exp\left\{-L \left(\sum_{j=1}^J \sigma_{j0}(\lambda) C_j + \varepsilon_{\text{Ray}}(\lambda) + \varepsilon_{\text{Mie}}(\lambda)\right)\right\},$$

имеющую смысл интенсивности в отсутствие селективного поглощения.

Перепишем выражение для $I'_0(\lambda)$, представив низкочастотную (медленно меняющуюся) часть в виде полинома l -го порядка.

$$I'_0(\lambda) = I_0(\lambda) \sum_p^l b_p \lambda^p. \quad (4)$$

Тогда, выражение (1) переписывается в виде

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \cdot \exp\left\{-L \sum_{j=1}^J \sigma'_j(\lambda) C_j + \sum_p^l b_p \lambda^p\right\}. \quad (5)$$

Прологарифмируем уравнение (5) и получим выражение для оптической толщины $D(\lambda)$ (6), зависящее от дифференциальных сечений поглощения, концентраций измеряемых газов, длины атмосферной трассы и полинома:

$$D(\lambda) = \ln\left(\frac{I(\lambda)}{I_0(\lambda)}\right) = -L \cdot \sum_{j=1}^J \sigma'_j(\lambda) C_j + \sum_p^l b_p \lambda^p. \quad (6)$$

Уравнение (6) можно представить в дискретном виде:

$$D(\lambda_k) = \ln(I(\lambda_k)/I_0(\lambda_k)) = -L \cdot \sum_{j=1}^J \sigma'_j(\lambda_k) C_j + \sum_p^l b_p \lambda_k^p. \quad (7)$$

Здесь $k = 1, n$; n – число дискретных отсчетов сигнала (определяется числом пикселей используемого детектора). По сути (7) представляет собой систему линейных уравнений, которую можно переписать в матричном виде и использовать тот или иной чис-

ленный метод, обеспечивающий лучшую устойчивость.

Экспериментальная установка

ДОАС-газоанализаторы обычно состоят из источника света, спектрального прибора, приемопередающего рефлектора и ретрорефлектора (моностатическая схема) [2]. Ранее в наших исследованиях использовался газоанализатор, в котором источником излучения выступала мощная ксеноновая лампа высокого давления [3, 4]. Недостатками дуговых ксеноновых ламп являются существенное снижение их характеристик после 200 ч работы и флуктуации мощности разряда, для снижения которых требуется введение обратной отрицательной связи между источником питания лампы и ее излучением. Кроме того, для поджига дугового разряда требуется высокое напряжение (десятки кВ), которое вызывает сильные электромагнитные помехи.

Успехи в разработке источников излучения на базе гетероструктур послужили созданию мощных светодиодов в широком диапазоне спектра, которые являются перспективной альтернативой газоразрядным лампам при использовании в составе газоанализаторов [5, 6]. На рис. 1. приведена принципиальная схема разработанного газоанализатора.

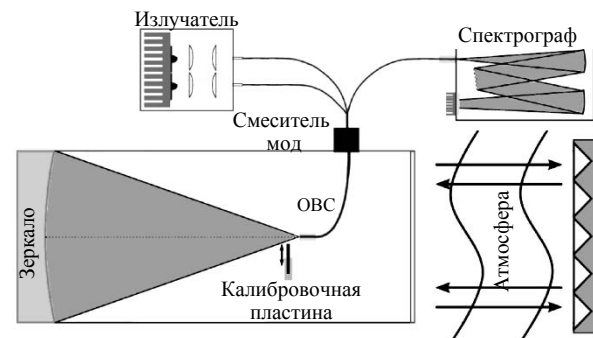


Рис. 1. Принципиальная схема ДОАС-газоанализатора

Световой пучок излучения светодиодов формируется с помощью сферического зеркала и направляется на открытую атмосферную трассу длиной от десятков до сотен метров, отражается угольным кварцевым отражателем и поступает в приемный канал телескопа. Размер и вес установки удалось значительно уменьшить, заменив кассегреневскую схему на коаксиальную конструкцию с оптоволоконной связью. Источник излучения связан с рефлектором многожильным оптико-волоконным световодом (ОВС), один конец которого помещен в фокальную плоскость сферического зеркала, выполняющего роль как передающего, так и принимающего устройства. Оптико-волоконный световод состоит из шести волокон диаметром 100 мкм для передачи и центрального диаметром 200 мкм для приема излучения. Это позволяет связать два светодиода в оптический канал, предварительно разделив волокна для передачи на две группы. Предусмотрена возможность подключения третьего источника для расширения спектра излучения или для увеличения

отношения сигнала к шуму. Использование такой схемы оптоволоконной связи исключает необходимость в каких-либо вторичных зеркалах и позволяет отделить источник излучения от рефлектора, что делает возможным облегчить конструкцию телескопа в целом. Такая конструкция в последние годы стала чрезвычайно популярна при создании автономных газоанализаторов [7–9]. В работе [7] подобный газоанализатор использовался для измерения реальных вулканических выбросов вулкана Ла-Фосса в Италии.

По световоду излучение попадает на входную щель монохроматора. В плоском поле изображения устанавливается линейка фотодиодов, сигнал с которой оцифровывается и поступает в компьютер для дальнейшей обработки. В качестве детектора использовался линейный датчик изображения Toshiba TCD 1205, имеющий 2048 пикселей с размером пикселя $0,014 \times 0,2 \text{ мм}^2$. Длина светочувствительной зоны детектора составляет 28,6 мм, при этом регистрируемый спектральный диапазон 190–500 нм определяется используемой дифракционной решеткой. Детектор обладает свойством, исключающим перетекание зарядов из засвеченных пикселей в соседние пиксели. Минимальное время накопления 4,2 мс, максимальное время накопления 4 с, максимальным временем накопления считается время, при котором темновой сигнал достигает 10% динамического диапазона.

Спектроскопические данные. Спектральные характеристики исследуемых газов являются одними из ключевых компонентов программного обеспечения метода ДООС. Прямое использование имеющихся баз спектральных данных невозможно по следующим причинам. Конструктивные особенности конкретного дистанционного оптического анализатора накладывают отпечаток на регистрируемый спектр из-за индивидуальной аппаратной функции прибора, что приводит к изменению вида полос и линий поглощения, формы которых могут отличаться от представленных в исходной базе спектральных данных. Также не всегда условия получения (температура, давление и т.д.) спектральных данных, в частности сечений поглощения, совпадают с реальными полевыми условиями. Адаптация данных спектральных параметров атмосферных газов проводилась путем свертки спектров высокого разрешения с аппаратной функцией нашего прибора.

В качестве источника излучения апробировались УФ-светодиоды, излучающие в области 365 и 395 нм, с мощностью излучения 20 и 30 мВт соответственно [<http://www.hamamatsu.ru/>]. Относительно малый интервал излучения длин волн светодиодов ограничивает измерения до трех газов: диоксида азота (NO_2), монооксида брома (BrO) и диоксида хлора (ClO_2) (рис. 2).

На рис. 2 представлены спектральные характеристики доступных нам светодиодов. Ввиду большой угловой расходимости излучения светодиодов было решено использовать двойную коллимацию

выходного излучения. Ультрафиолетовые светодиоды устанавливались в мини-коллиматор прожекторного типа. Коллиматор использовался в качестве предварительного коллимационного устройства. Дальнейшая коллимация излучения осуществлялась основным зеркалом с диаметром 0,2 м и фокусным расстоянием 1 м.

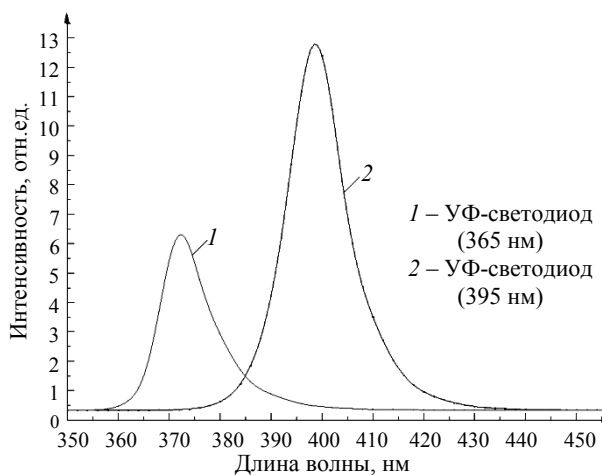


Рис. 2. Относительное спектральное распределение интенсивностей УФ-светодиодов

Дифференциальные сечения исследуемых газов поглощения газов представлены на рис. 3. Расчет сечений поглощения газов, попадающих в область излучения используемых диодов, проводился с использованием аппаратной функции прибора на основе спектроскопической информации базы HITRAN [<https://www.cfa.harvard.edu/hitran/>].

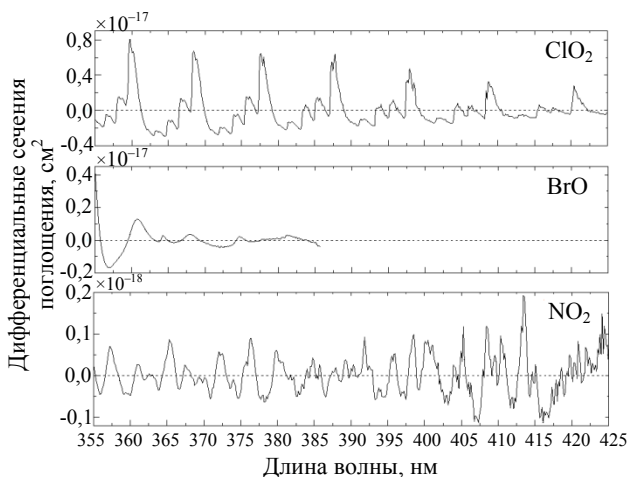


Рис. 3. Дифференциальные сечения поглощения диоксида хлора, оксида брома и диоксида азота

Видно, что интересующие нас соединения имеют выраженные спектральные особенности в области излучения используемых светодиодов и, следовательно, могут быть зарегистрированы при концентрациях, превышающих некий порог, который следует определить.

Минимально детектируемые концентрации. Для оценки возможностей газоанализатора проводи-

лись оценки минимально детектируемых концентраций (МДК) в режиме реального времени.

Ключевой характеристикой, определяющей чувствительность метода ДООС, является минимально детектируемая толщина $D_0(\lambda)$, определяемая статистикой фотоэлектронов (дробовой шум) S_1 , тепловым и фотонным шумами, включая прочие шумы S_2 :

$$D_0(\lambda) = \sqrt{S_1^2 + S_2^2}, \quad (8)$$

где $S_1 = N^{-1/2}$, а N – число фотонов, типичные значения для твердотельных фотоприемников $S_2 = B \approx 10^{-4}$. Число фотонов легко оценить:

$$N = \frac{P \cdot t_m \cdot \eta \cdot \lambda}{hc}, \quad (9)$$

здесь P – мощность излучения; t_m – время накопления; η – квантовая эффективность; λ – длина волны; h – постоянная Планка; c – скорость света. Полагая $\lambda = 370$ нм; $\eta = 0,5$; $t_m = 150$ с и варьируя P в пределах от 10^{-6} до 10^{-2} Вт, можно увидеть, что дробовой шум не является определяющим.

С учетом этого получаем оценку минимальной детектируемой толщи:

$$D_0(\lambda) = \sqrt{N^{-1} + B^2} = \sqrt{\frac{hc}{P \cdot t_m \cdot \eta \cdot \lambda} + B^2} \approx 5 \cdot 10^{-4}. \quad (10)$$

Проведем оценки МДК с учетом уравнения (7). Рассчитанная МДК для трассы длиной 500 м составляет 0,09 мкг/м³ для ClO₂ (диоксид хлора); 0,07 для BrO (оксид брома); 5,4 для NO₂ (диоксид азота) соответственно. Также проведен расчет МДК и для некоторых других соединений. Так, для C₆H₆O (фенол) МДК составила 0,7; для C₉H₁₂ (триметилбензол) – 20; для C₉H₁₂O (триметилфенол) – 30; для C₈H₈O (толуилальдегид) – 4; для C₈H₁₀O (диметилфенол) – 7; для C₇H₈O (крезол) – 4; для C₈H₁₀ (ксилол) – 20 соответственно.

Экспериментальные результаты. Проведена серия измерений концентраций газов монооксида брома (BrO), диоксида хлора (ClO₂) и азота (NO₂) в южной части г. Томска. Протяженность трассы составила 500 м (250 м до ретрорефлектора).

Узкополосные спектральные структуры, полученные из измеренной оптической толщи, сравнивались с узкополосными структурами сечений поглощения искомым газом, взятыми из базы данных HITRAN и подвергнутыми процедуре сверки с аппаратной функцией спектрометра.

Процедура подгонки состояла из комбинации нелинейного метода Левенберга–Марквардта и стандартного линейного метода наименьших квадратов [10, 11].

$$\sum_{k=1}^n \left| D(\lambda_k) - \sum_{j=1}^J a_j \sigma_{jk} - \sum_p b_p \lambda^p \right|^2 \rightarrow \min, \quad (11)$$

где $\alpha_j = C_j L$.

При расчетах использовались алгоритм и программа определения концентраций многокомпонентных газовых смесей [12].

Для повышения точности подгонки проводился сдвиг зарегистрированного спектра в пределах $\pm 0,3$ нм с шагом спектрального разрешения спектрометра, что позволило компенсировать изменения, связанные с картированием длины волны – пиксели спектрометра, вызванные флуктуациями температуры окружающей среды.

Оценка зарегистрированных спектров поглощения по остаточным структурам и рассчитанная гипотетическая оптическая толщина, обусловленная поглощением трех газов (монооксида брома, диоксида хлора и азота), представлена на рис. 4.

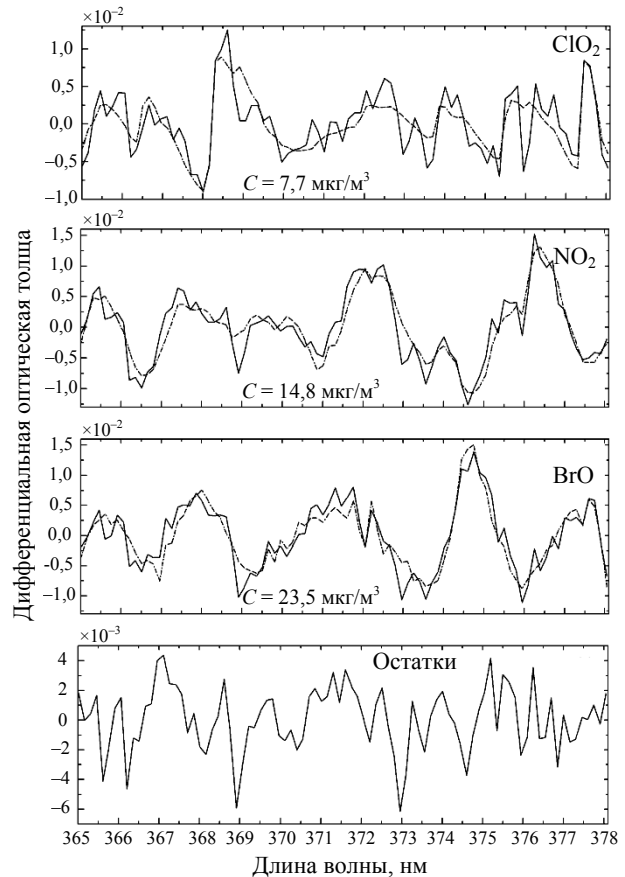


Рис. 4. Оценка измеренных спектров поглощения для ClO₂, NO₂ и BrO

Суть его состоит в том, что из реальной дифференциальной оптической толщи, полученной с трассы (сплошная кривая на верхнем рис. 4, с выраженными пиками на 368,6 и 377,5 нм варьированием концентрации ClO₂, методом наименьших квадратов подбирается дифференциальная оптическая толщина, обусловленная поглощением ClO₂ (пунктирная кривая на верхнем рис. 4).

Спектры поглощения других более 40 газов предварительно анализируются на предмет поглощения в этих областях. Затем из исходной оптической толщи убирается оптическая толщина, обусловленная поглощением ClO₂, получается сплошная линия на среднем рис. 4. Процедура последовательно повторяется для NO₂ и BrO. В рассматриваемой спектральной области наибольший вклад в поглощение вносят три газа: ClO₂, NO₂, BrO, но имеется

поглощение H_2CO (формальдегид), и HNO_2 (сечения поглощения порядка 10^{-22} см²) и димеров молекулы кислорода O_4 (10^{-46} см²). Возможно, неучет этого поглощения и рассеянного солнечного света приводит к значительным остаткам. Мы рассчитывали погрешности не на всем спектральном интервале 365–378 нм, приведенном на рис. 4, а на несколько меньших интервалах. К примеру, для BrO интервал выбирался от 366,96 до 377,75 нм.

Рассчитанные значения концентраций при использовании светодиода с максимумом 371 нм составляют: диоксид хлора $7,7 \pm 1,5$ мкг/м³ ($3,85 \pm 0,75$ ppb); оксид брома $23,5 \pm 2$ мкг/м³ ($36,4 \pm 3,2$ ppb); диоксид азота $14,8 \pm 1,8$ мкг/м³ ($7,4 \pm 0,9$ ppb).

Следует отметить, что местоположение измерительной трассы характеризуется как фоновое для указанных газов. Полученные значения концентраций для диоксида азота (NO_2) хорошо согласуются с данными, полученными со станции «Фоновой» (60 км западнее г. Томска), где проводятся почасовые измерения диоксида азота. Мы сравнили полученные данные для монооксида брома, диоксида хлора и азота с результатами измерений газоанализатором на основе дуговой ксеноновой лампы высокого давления (Osram XBO 150 W). Оказалось, что значения концентраций неплохо согласуются между собой (различия не более 20%), но при этом ошибки измерений газоанализатором на основе ксеноновой лампы больше в среднем в 1,5 раза. Это обусловлено, прежде всего, различием спектральных характеристик источников излучения. Увеличить отношение сигнал/шум можно использованием двух или более светодиодов с одинаковыми спектральными характеристиками, объединенных в один оптический канал. Точность измерений можно повысить путем увеличения трассы за счет возрастания оптической толщи измеряемых газов.

Заключение

В статье приводятся описание методики и результаты расчетов минимально детектируемых концентраций оксидов хлора и брома с помощью газоанализатора на основе ультрафиолетовых светодиодов. Создан и протестирован макет портативного энергонезависимого дистанционного трассового газоанализатора. Проведенные расчеты и эксперименты показали возможность дистанционного детектирования оксидов хлора и брома с высокой чувствительностью при использовании коммерчески доступных светодиодов УФ-диапазона спектра. Направление дальнейших работ должно быть связано с метрологической аттестацией газоанализатора.

Литература

1. Platt U. Differential optical absorption spectroscopy / U. Platt, J. Stutz. – Berlin; Heidelberg: Springer Verlag, 2008. – 593 p.
2. Lee J.S. Development of a Differential Optical Absorption Spectroscopy (DOAS) System for the Detection of Atmospheric Trace Gas Species: NO_2 , SO_2 , and O_3 / J.S. Lee, B.J. Kuk, Y.J. Kim // J. of the Korean Phys. Soc. – 2002. – Vol. 41, No. 5. – P. 693–698.

3. Гейко П.П. Многокомпонентный дистанционный газоанализ атмосферы в УФ-области спектра / П.П. Гейко, С.С. Смирнов, И.В. Самохвалов // Изв. вузов. Физика. – 2015. – Т. 58, № 8/3. – С. 218–221.

4. Geiko P.P. Detection of concentration small gas components of atmosphere by DOAS method / P.P. Geiko, S.S. Smirnov, I.V. Samokhvalov // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). – 2015. – Vol. 24, No. 2. – P. 152–158.

5. Applicability of light-emitting diodes as light sources for active differential optical absorption spectroscopy measurements / C. Kern, S. Trick, B. Rippel, U. Platt // Applied Opt. – 2006. – Vol. 45, No. 9. – P. 2077–2068.

6. Катаев М.Ю. Анализ содержания метана атмосферы с помощью инфракрасных LED-диодов // Доклады ТУСУРа. – 2015. – Т. 38, № 4. – С. 155–160.

7. Vita F. Development of a portable active long-path differential optical absorption spectroscopy system for volcanic gas measurements / F. Vita, C. Kern, S. Inguaggiato // J. Sens. Syst. – 2014. – Vol. 3, No. 1. – P. 355–367.

8. An instrument for measurements of BrO with LED-based Cavity-Enhanced Differential Optical Absorption Spectroscopy / D.J. Hoch, J. Buxmann, H. Sihler et al. // Atmos. Meas. Tech. – 2014. – No. 7. – P. 199–214.

9. A novel dual-LED based long-path DOAS instrument for the measurement of aromatic hydrocarbons / J. Stutz, S. Hurlock, S. Colosimo et al. // Atmospheric Environment. – 2016. – Vol. 147, No. 1. – P. 121–132.

10. Marquardt D.W. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters // J. Soc. Indust. Appl. Math. – 1963. – Vol. 11, No. 2. – P. 431–441.

11. Stutz J. Numerical analysis and estimation of the statistical error of differential optical absorption spectroscopy measurements with least-squares methods / J. Stutz, U. Platt // Appl. Optics. – 1996. – Vol. 35. – P. 6041–6053.

12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016611377. Программа определения концентраций многокомпонентных газовых смесей в приземной атмосфере по их селективному поглощению излучения в УФ-области спектра / С.С. Смирнов, И.Д. Брюханов, Е.В. Ни. – Заявка №2015662194. Дата поступления 14 декабря 2014 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 01 февраля 2016 г.

Гейко Павел Пантелеевич

Д-р физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник
Института мониторинга
климатических и экологических систем СО РАН,
профессор каф. оптико-электронных систем
и дистанционного зондирования (ОЭСИДЗ)
Национального исследовательского
Томского государственного университета
Тел.: 8-905-991-9762, (382-2) 41-38-87
Эл. почта: ppg@imces.ru

Смирнов Сергей Сергеевич

Аспирант каф. ОЭСИДЗ
Тел.: 8-952-895-17-30, (382-2) 41-39-84
Эл. почта: sssmirnov@sibmail.com

Geiko P.P., Smirnov S.S.

Atmosphere halogen oxides concentration retrieving by differential optical spectroscopy in the UV region of the spectrum

The method of differential optical absorption spectroscopy is an effective tool for open-path measurements of atmospheric gases and impurities. The gas analyzers based on this method traditionally include a high pressure xenon lamp as the radiation source, that require high voltage, which makes gas analyzers bulky and power-inefficient. Recent developments in

fiber-coupling telescope technology and the availability of ultraviolet light emitting diodes have now allowed us to construct a portable, long path gas analyzer. The gas analyzer comprises two UV-LEDs emitting in the near UV-region of the spectrum, system of optical fibers, receiving-transmitting telescope, spectrometer and treatment system. The article presents a description of the methodology and results of the measurement of chlorine and bromine oxides with gas analyzer based on UV-LEDs.

Keywords: differential optical spectroscopy, absorption cross-section ultraviolet LEDs, chlorine dioxide, bromine oxide.

УДК 621.397:004.932.2

Д.А. Салыкова, А.Н. Утемисов, В.В. Капустин

Повышение качества изображений активно-импульсных телевизионно-вычислительных систем с использованием алгоритмов инверсной фильтрации

Обработаны результаты экспериментальных исследований активно-импульсной телевизионно-вычислительной системы, вычислены функции рассеяния перепада и функции рассеяния точки для изображений, полученных в различных условиях наблюдения. Повышена разрешающая способность изображений активно-импульсной телевизионно-вычислительной системы с использованием алгоритмов инверсной фильтрации.

Ключевые слова: активно-импульсные телевизионно-вычислительные системы, функция рассеяния перепада, функция рассеяния точки, фильтр Винера.

doi: 10.21293/1818-0442-2017-20-4-39-42

Активно-импульсные телевизионно-вычислительные системы (АИТВС), применяются для визуального обнаружения и идентификации объектов в сложных метеоусловиях и при низкой освещенности.

Сложные условия видимости (туман, дымка, пыль, снегопад, дождь) значительно ограничивают дальность обнаружения и вероятность распознавания объектов в традиционных системах видеонаблюдения. Основной причиной ограничения дальности обнаружения и идентификации объектов интереса в сложных условиях видимости является воздействие помехи обратного рассеивания [1].

Помеха обратного рассеивания возникает из-за рассеяния фотонов света на аэрозолях атмосферы в направлении наблюдателя, что приводит к значительному снижению контраста изображения и как следствие к невозможности обнаружения и распознавания объектов интереса.

АИТВС предназначены для работы в сложных условиях видимости и способны обеспечить регистрацию характеристик только нужного объекта наблюдения либо его части благодаря селекции изображения по дальности в пределах очень узкой глубины просматриваемого пространства (активной зоны видения).

Принцип работы активно-импульсных систем наблюдения основан на импульсном подсвете пространства и стробировании по времени фотоприемного устройства, оснащенного быстродействующим затвором [2].

Импульсный режим работы системы позволяет сформировать активную зону видения и исключить все, что находится за ее пределами. Управление положением активной зоной видения осуществляется путем изменения задержки времени открытия затвора фотоприемника относительно импульса подсвета.

В зависимости от изменения условий окружающей среды применяются различные режимы работы АИТВС: непрерывный, активно-непрерывный или активно-импульсный с временной селекцией импульсов излучения, отраженных от объектов.

В состав системы входят: входной объектив, электронно-оптический преобразователь (ЭОП), согласующий объектив, ТВ-датчик (монохромный

КМОП сенсор 800 ТВЛ) с повышенной чувствительностью, устройство подсвета, источник питания, блоки управления и ЭВМ со специализированным программным обеспечением. Устройством подсвета является импульсный лазерный полупроводниковый излучатель (ИЛПИ), работающий в ближнем инфракрасном (ИК) диапазоне спектра (рис. 1).

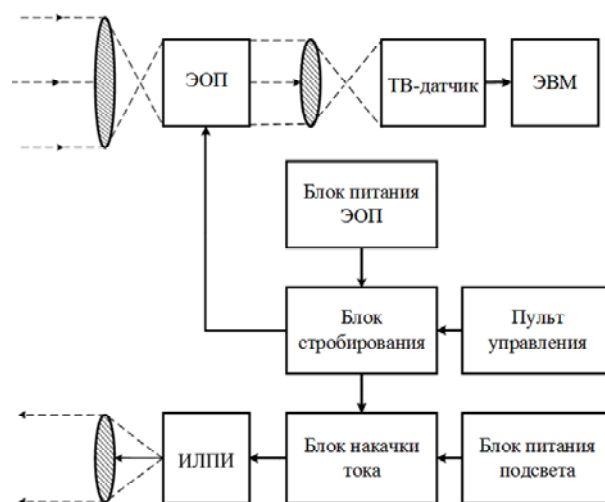


Рис. 1. Структурная схема АИТВС

За счет особенностей конструкции АИТВС обладают высоким диапазоном регулировки чувствительности к освещенности. Помимо изменения значения диафрагмы входного объектива, управлять чувствительностью системы можно путем изменения коэффициента усиления ЭОП, коэффициента усиления ТВ-датчика, изменения частоты, длительности и амплитуды импульсов подсвета и импульсов стробирования ЭОП.

Основные характеристики макета АИТВС представлены в табл. 1.

Таблица 1

Технические характеристики макета АИТВС

Характеристика	Значения
Дальность видимости системы	200 м
Угол поля зрения системы	12 град
Оптическая мощность подсвета в импульсе	320 Вт
Длина волны излучения подсвета	842 нм
Частота повторения импульсов подсвета	5000 Гц

Постановка задачи

Конструкция приемного блока макета АИТВС состоит из двух объективов (входной и согласующий) и двух фотоприемных устройств (ЭОП и КМОП-сенсор), что приводит к уменьшению разрешающей способности изображений АИТВС. Задачей исследования является оценка функции рассеяния точки (ФРТ) и повышение разрешающей способности изображений макета АИТВС с использованием алгоритмов инверсной фильтрации. Необходимо вычислить ФРТ изображения для последующего применения фильтра Винера.

Результаты эксперимента

При помощи действующего макета активно-импульсной телевизионно-вычислительной системы в большой аэрозольной камере (БАК) проводился ряд экспериментов в условиях нормальной и пониженной прозрачности среды распространения.

Для вычисления значения ФРТ анализируемого кадра необходимо определить функцию рассеяния перепада (ФРП). Для нахождения значения ФРП необходимо выделить область изображения, содержащую вертикальный или горизонтальный перепад яркости.

На рис. 2 представлена область изображения, содержащая оптический перепад яркости.

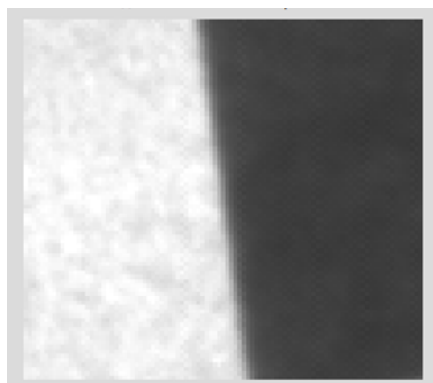


Рис. 2. Выделенная область изображения для оценки ФРП

Значение ФРП может быть получено при анализе значений интенсивностей пикселей по одной строке выделенной области или для более точного результата путем усреднения всего массива строк.

Для повышения точности результата усреднения массива строк оптический перепад яркости должен быть расположен под небольшим углом ($10\text{--}20^\circ$). Значение границы перепада находится на основе анализа ФРП в каждой строке анализируемой области за счет использования конечно-разностной схемы $[-1; 1]$.

Вычисление усредненной по строкам ФРП и дальнейшее нахождение ФРТ выполнялись в среде разработки MATLAB.

На рис. 3 представлен график ФРП, полученный по фрагменту изображения АИТВС, содержащего оптический перепад яркости.

ФРТ может быть вычислено при помощи свертки значений ФРП с коэффициентами $[-0,5; 0,5]$.

На рис. 4 представлен график ФРТ, вычисленный по данным ФРП.

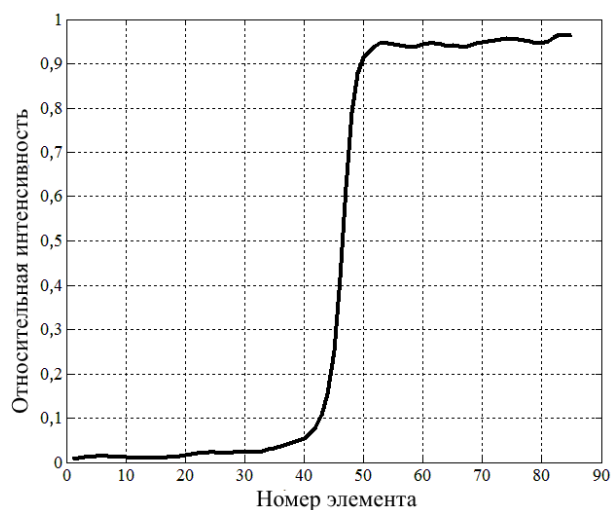


Рис. 3. Функция рассеяния перепада (ФРП) выделенной области

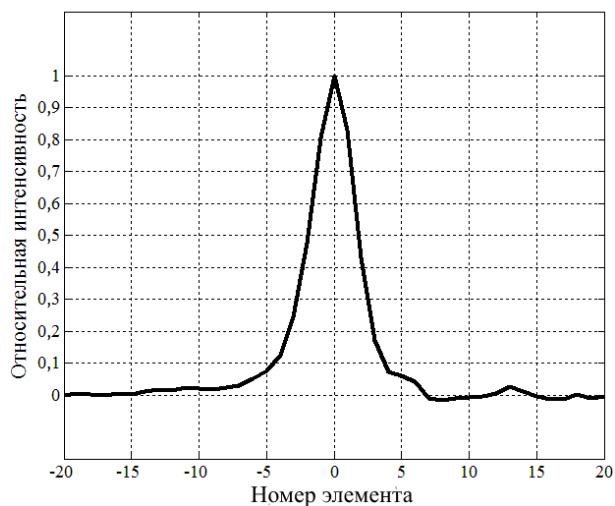


Рис. 4. Функция рассеяния точки (ФРТ) выделенной области

Повышение качества изображений

Для повышения разрешающей способности изображений АИТВС был применен фильтр Винера с использованием найденного значения ФРТ.

Фильтр Винера представляет изображение и шум как случайные процессы и находит такую оценку для искаженного изображения, чтобы среднеквадратическое отклонение этих величин было минимальным [4].

Данный фильтр является инверсным и при отсутствии шумов на изображении может считаться идеальным восстанавливающим фильтром [5].

На рис. 5, 6 представлены сравнительные изображения до и после применения инверсной фильтрации.

Измерение разрешения изображений до и после применения инверсной фильтрации выполнялось в программе Imatest [6].

Для того чтобы определить разрешение изображения, необходимо знать зависимость контраста между черной и белой линиями от числа телевизионных линий в кадре, так называемую контрастно-частотную характеристику (КЧХ), которую позволяет измерить и сформировать программа Imatest.

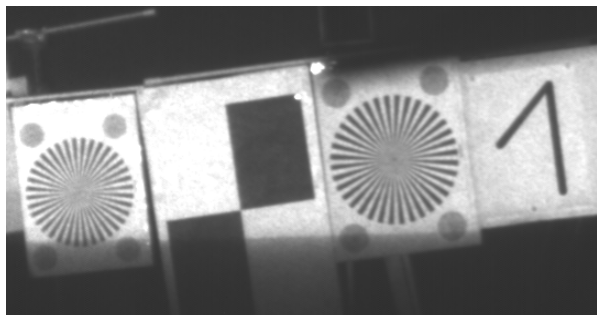


Рис. 5. Исходное изображение (до обработки)

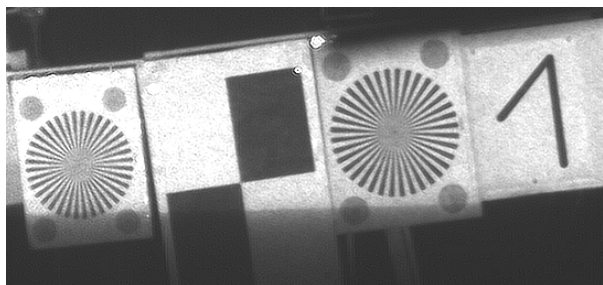


Рис. 6. Улучшенное изображение после применения фильтра Винера с использованием вычисленного значения ФРТ

Максимально возможное количество телевизионных линий (ТВЛ) будет получено в случае, если одна линия приходится на один пиксель, что соответствует значению 0,5 цикла на пиксель. Исходя из этого, можно получить выражение для перевода количества циклов на пиксель в ТВЛ [7, 8]:

– $ТВЛ = (C/P) \times \text{количество элементов (пикселей изображения)}$, где C/P – число «циклов на пиксель».

На рис. 7, 8 представлены измеренные значения КЧХ исходного и восстановленного изображений.

Значения разрешения исходного и восстановленного изображения в ТВЛ представлены в табл. 2.

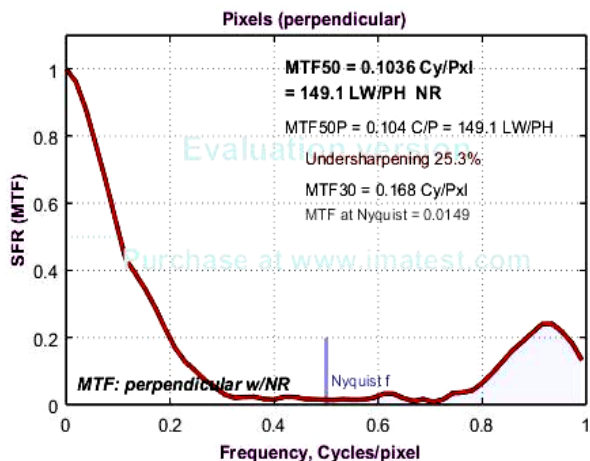


Рис. 7. КЧХ выделенной области исходного изображения

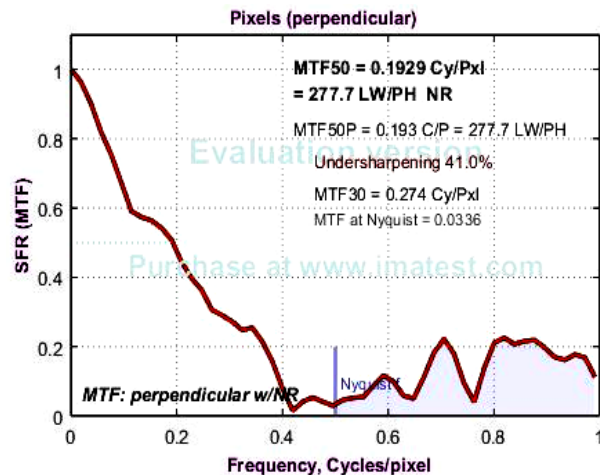


Рис. 8. КЧХ выделенной области восстановленного изображения

Таблица 2
Разрешающая способность изображений до и после восстановления с использованием фильтра Винера

Уровни КЧХ	ТВЛ исходного изображения	ТВЛ восстановленного изображения
0,5	149,184	277,7
0,3	241,92	394,56
0,1	358,56	568,8

Выводы

В результате проведенных исследований было установлено, что разрешающая способность изображений макета активно-импульсной телевизионно-вычислительной системы из-за особенностей конструкции приемного блока не превышает 400 ТВЛ. Низкая разрешающая способность изображений АИТВС ограничивает максимальную дальность обнаружения и распознавания объектов интереса.

Вычисление функции рассеяния точки анализируемого изображения и последующее применение инверсной фильтрации (фильтр Винера) позволяют эффективно повысить разрешающую способность изображений АИТВС до 1,8 раза.

Полученные в данном исследовании результаты могут быть использованы при проектировании телевизионных систем для повышения их максимальной дальности обнаружения и распознавания объектов интереса.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России по проекту 8.9562.2017/БЧ и гранту РФФИ № 16-47-700939.

Литература

1. Мищенко Н.И. Методы и средства повышения эффективности активно-импульсных телевизионно-вычислительных систем мониторинга и обеспечения безопасности объектов / Н.И. Мищенко, И.Н. Пустынский, В.В. Капустин // Доклады ТУСУРа. – 2016. – № 3, т. 19. – С. 42–46.
2. Kapustin V.V. Vision area parameters analysis for active-pulse television-computing systems / V.V. Kapustin, A.K. Movchan, M.I. Kuryachiy // 2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – 2017. – P. 1–4. – <http://ieeexplore.ieee.org/document/7998432>

3. Капустин В.В. Анализ особенностей изображений активно-импульсных телевизионно-вычислительных систем / В.В. Капустин, А.К. Мовчан, М.И. Курячий // Матер. междунар. науч.-техн. конф. «Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации «Распознавание–2017». Юго-Зап. гос. ун-т. – Курск, 2017. – С. 188–190.

4. Салыкова Д.А. Восстановление расфокусированных изображений с использованием алгоритмов инверсной фильтрации / Д.А. Салыкова, А.К. Мовчан // Матер. междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2017». – Томск: В-Спектр, 2017. – Ч. 1. – С. 211–213.

5. Цифровая обработка изображений в информационных системах: уч. пособие / И.С. Грузман, В.С. Киричук, В.П. Косых и др. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. – 352 с.

6. Imatest Documentation by Norman Koren [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.imatest.com/docs>, свободный (дата обращения: 10.03.2017).

7. Malanin M.Yu. Optimization of parameters of two dimensional filters of increase of clearness of television images on contrastly to frequency characteristics / M.Yu. Malanin, A.V. Kamenski, M.I. Kuryachiy // Control and Communications (SIBCON), IEEE 2015 International Siberian Conference on. – 2015. – P. 1–4. – <http://ieeexplore.ieee.org/document/7147136>

8. Капустин В.В. Оценка качества изображений высокого разрешения при внутрикадровом сжатии в стандартах JPEG и JPEG2000 / В.В. Капустин, А.В. Каменский // Доклады ТУСУРа. – 2016. – Т. 19, № 3. – С. 27–31.

Салыкова Дана Алпысбайкызы

Магистрант каф. телевидения и управления (ТУ) ТУСУРа

Тел.: +7-923-411-32-14

Эл. почта: dana.salykova@mail.ru

Утемисов Адильхан Нурланович

Магистрант каф. ТУ

Тел.: +7-923-435-21-95

Эл. почта: nice_twice@inbox.ru

Капустин Вячеслав Валериевич

Мл. науч. сотр. каф. ТУ

Тел.: +7-960-969-88-77

Эл. почта: peregnun@mail.ru

Salykova D.A., Utemissov A.N., Kapustin V.V.

Quality improvement for the images in active pulse TV systems using inverse filtering algorithms

The results of experimental studies of the active-pulse television-computer system are processed, the edge spread function and the point spread function calculated for images obtained under different observation conditions are calculated. The resolving power of images of an active-pulse television-computer system is increased using inverse filtering algorithms.

Keywords: active pulse TV system, point spread function, edge spread function, Wiener filter.

УДК 681.586.5

В.И. Бусурин, В.В. Коробков, Йин Наинг Вин

Исследование влияния параметров кольцевого резонатора на характеристики трёхосевого оптоэлектронного преобразователя угловой скорости

Предложены структура и математическая модель трёхосевого кольцевого оптоэлектронного преобразователя угловой скорости на основе оптического туннельного эффекта (ОТЭ). Определена функция преобразования трёхосевого волнового оптоэлектронного преобразователя угловой скорости. Исследовано влияние параметров кольцевого резонатора на частоту собственных колебаний и второе движение, а также оптоэлектронного модулятора на отражательную способность, мощность фотоприемника и выходное напряжение.

Ключевые слова: кольцевой волновой резонатор, трёхосевой оптоэлектронный преобразователь, угловая скорость, оптическое туннелирование, частота собственных колебаний, функция преобразования, зазор, радиальное движение.

doi: 10.21293/1818-0442-2017-20-4-43-49

Преобразователи угловых скоростей широко используются в системах управления различных подвижных объектов и в качестве индикаторов углового вращения. При построении многоосевого преобразователя угловых скоростей используют несколько одноосевых преобразователей угловых скоростей в желаемой конфигурации. Однако если есть возможность использования одного резонатора для многоосевого измерения угловых скоростей, то это более эффективно. В статье рассмотрена возможность многоосевого измерения угловых скоростей с оптическим съёмом первичной информации и одним кольцевым резонатором. Исследовано влияние конструктивных параметров кольцевого резонатора на характеристики трёхосевого преобразователя угловых скоростей на основе ОТЭ.

Функциональная схема трёхосевого волнового оптоэлектронного преобразователя угловой скорости

Основным элементом преобразователя является чувствительный элемент (ЧЭ). Частный случай ЧЭ датчика угловой скорости (ДУС) с распределёнными параметрами – это кольцевой резонатор, который совершает колебания в направлении, соответствующем основной колебательной моде. Кольцевой резонатор (КР) – это тонкое упругое кольцо, которое совершает колебательное движение в своей плоскости. Если на кольцевой резонатор воздействуют только постоянные вибрации без угловой скорости, то он принимает форму эллипса. При вибрации кольцевой резонатор, растягиваясь в противоположные стороны, а затем сжимаясь, постоянно меняет свою эллиптичность, сохраняя положение главных осей. Такое состояние называется первым режимом (рис. 1, а). Первый режим может возбуждаться с помощью генераторов различных типов: электромагнитных, электростатических, пьезоэлектрических [1].

Ускорение Кориолиса, возникающее из-за угловых скоростей, вызывает распределение в плоскости сил инерции вокруг кольца. Эти силы вызывают вторые режимы (рис. 1, б и в). Во вторых режимах

движение кольцевого резонатора пропорционально измеряемой угловой скорости, поэтому величины амплитуд вторых движений определяют измеряемую величину угловой скорости относительно соответствующей оси [2].

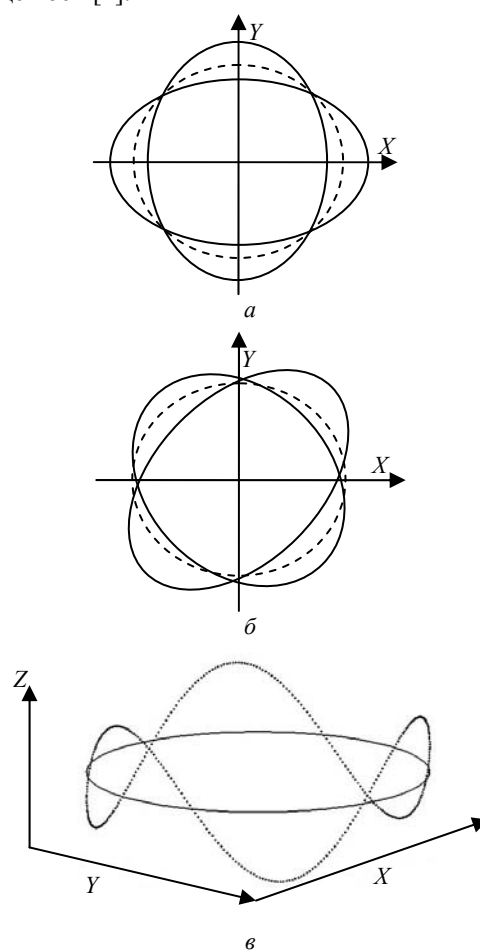


Рис. 1. Первый режим (а) и вторые режимы движения при измерении угловых скоростей: Ω_z (б), Ω_x и Ω_y (в)

На рис. 2 представлена структурная схема трёхосевого волнового оптоэлектронного преобразова-

теля угловой скорости, в которой использованы: источник излучения (ИИ), кольцевой резонатор (КР), модуляторы на основе оптического туннельного эффекта (МОТЭ), фотоприемники (ФП), электронный блок обработки (ЭБ).

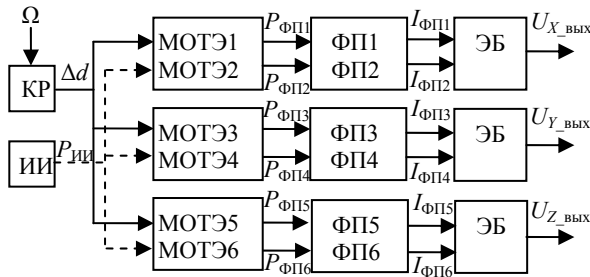


Рис. 2. Структурная схема трёхосевого волнового оптоэлектронного преобразователя угловой скорости

При существующей угловой скорости (Ω_z) точки в плоскости кольца ($45, 135, 225$ и 315° относительно главных осей) показывают величину измеряемой угловой скорости. В точках на плоскости кольца ($0, 60, 120, 180, 240$ и 300° для Ω_x и $30, 90, 150, 210, 270$ и 330° для Ω_y) определяются измеряемые угловые скорости. Для уменьшения требуемой амплитуды движений и исключения сил электростатического притяжения для съема информации о движении во вторых режимах вместо традиционных емкостных датчиков микроперемещений используются 3 пары оптических считывающих узлов, которые определяют величины и направления вторых движений. Система съема информации трёхосевого волнового оптоэлектронного преобразователя угловых скоростей состоит из оптических считывающих узлов. Эти оптические считывающие узлы размещаются вдоль дополнительных осей под углом 45 и 135° в плоскости кольца (П1-П2) для Ω_z и вдоль дополнительных осей под углом $180, 360^\circ$ под плоскостью кольца (П3-П4) для Ω_x и $90, 270^\circ$ над плоскостью кольца (П5-П6) для Ω_y (рис. 3).

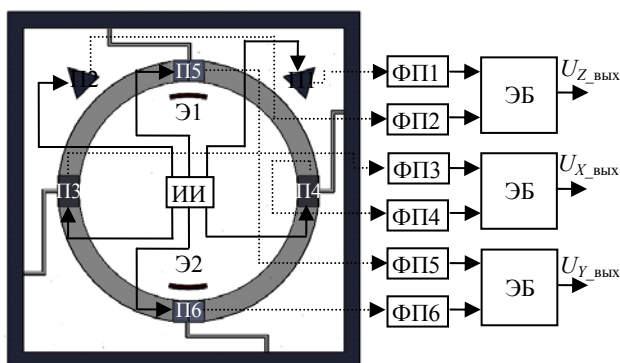


Рис. 3. Функциональная схема трёхосевого волнового оптоэлектронного преобразователя угловой скорости

Для обеспечения измерения угловой скорости по трем осям необходимо произвести выбор параметров резонатора, обеспечивающий эффективное

считывание первичной информации с помощью оптического туннелирования «в плоскости» и «на плоскости» кольцевого резонатора.

Анализ амплитуды первого движения и собственных частот колебания резонатора трехосевого кольцевого оптоэлектронного преобразователя угловой скорости

При возбуждении резонатор имеет форму стоячей волны. При отсутствии угловой скорости кольцевого резонатор принимает в режиме ($\cos 2\theta$) и вибрирует с определенной частотой. Такое состояние называется первым режимом. Первый режим может возбуждаться с помощью метода позиционного возбуждения. Для обеспечения возбуждений кольцевого резонатора применяется позиционное возбуждение, которое реализуется с помощью пары электродов. Внутренняя поверхность кольцевого резонатора и электроды покрыты тонким электропроводящим слоем, поэтому кольцевой резонатор и электрод являются обкладками цилиндрического конденсатора. На пару противоположных электродов подается переменное электрическое напряжение с определенной частотой, которая меньше, чем собственная частота, в 2 раза [3].

На рис. 4 приведены зависимости отражательной способности сред от расстояния между призмой и кольцевым резонатором при следующих параметрах: угол падения излучения $\theta = 42^\circ$, $n_1 = 1,52$, $n_2 = 1$ и $\lambda = 900$ нм. На графике показаны также увеличенные изображения амплитуд вторых движений по времени при толщине КР $t = 300$ мкм и диаметре КР $D = 5$ мм.

Таким образом, целесообразно выбирать начальный зазор между призмой и кольцевым резонатором в диапазоне $200-600$ нм при первом движении $10-60$ мкм, обеспечивающий необходимую максимальную величину вторых движений и зазора около сотен нанометров при угловых скоростях сотни градусов в секунду.

Величина выходного сигнала в схемах с кольцевым волновым резонатором зависит от частоты его колебаний. Частоты колебаний резонатора зависят от его размеров и числа кванторов (n), а также от плотности и модуля упругости материала. Частота собственных колебаний второго режима «в плоскости» определяется как [4]:

$$f_1 = \frac{n(n^2 - 1)}{\pi \cdot D^2 \sqrt{n^2 + 1}} \sqrt{\frac{E \cdot t^2}{3 \cdot \rho}},$$

где E – модуль упругости (Юнга); t – толщина кольца; h – высота кольца; ρ – плотность материала; D – диаметр кольца; n – узловой диаметр.

Для частоты собственных колебаний второго режима «на плоскости» частота собственных колебаний определяется как

$$f_2 = \frac{2 \cdot n \cdot h \cdot (n^2 - 1)}{\pi \cdot D^2} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho \left(12 \cdot n^2 + 6,67 \cdot \left(1 + \frac{h^2}{t^2} \right) \cdot (1 + \nu) \right)}},$$

где ν – коэффициент Пуассона.

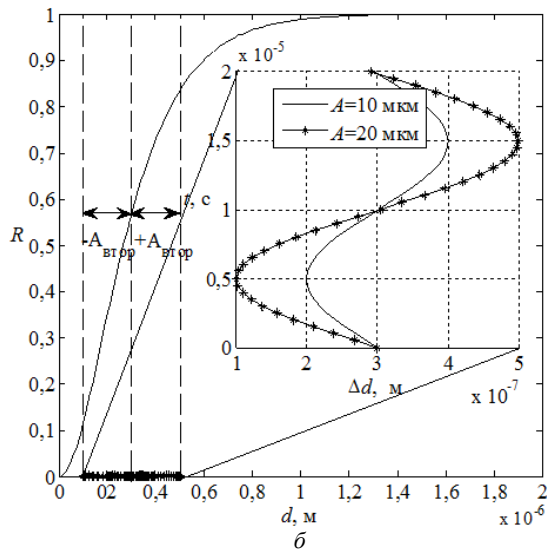
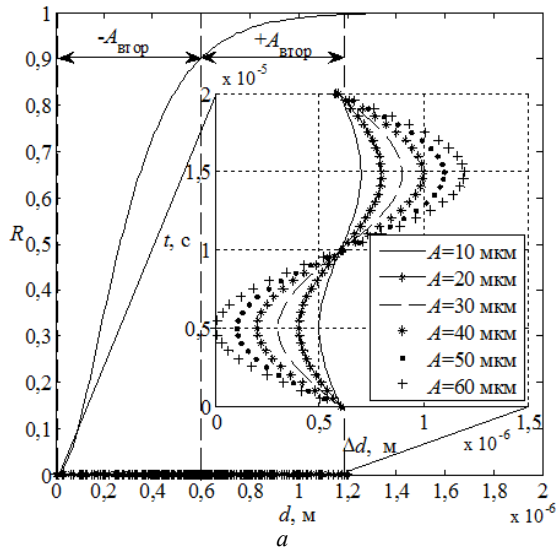


Рис. 4. Определение диапазона второго движения при $d_0 = 0,6$ мкм, первое движение $A = 10-60$ мкм (а) при $d_0 = 0,3$ мкм, первое движение $A = 10-20$ мкм (б)

Для правильного функционирования КР необходимо, чтобы частота собственных колебаний режима «в плоскости» и режима «на плоскости» имели одинаковую резонансную частоту [2]. Разностная частота собственных колебаний ($F = f_1 - f_2$) зависит от значений толщины и ширины кольца (рис. 5).

Для одинаковой резонансной частоты собственных колебаний второго режима «в плоскости» и второго режима «на плоскости» определено отношение высоты к толщине кольцевого резонатора (рис. 6, а). Когда частоты собственных колебаний второго режима «в плоскости» f_1 и второго режима «на плоскости» f_2 равны, должно выполняться соотношение между толщиной и шириной КР в виде: $h \approx 0,35t$ (рис. 6, б). При таком соотношении ($h \approx 0,35t$) появляется возможность эффективного измерения угловых скоростей по трем осям при использовании одного резонатора.

Таким образом, целесообразно выбирать толщину и высоту КР порядка сотни микрометров, что обеспечивает необходимую максимальную величину

вторых радиальных движения и изменений зазора около сотен нанометров при угловых скоростях сотни градусов в секунду.

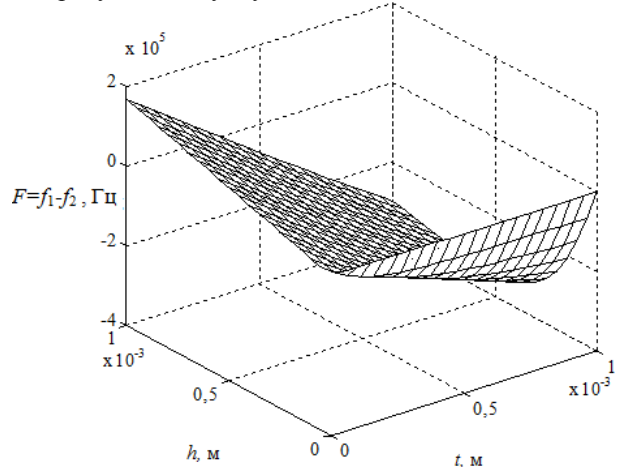


Рис. 5. Разностная частота собственных колебаний при разных величинах толщины и высоты кольцевого резонатора

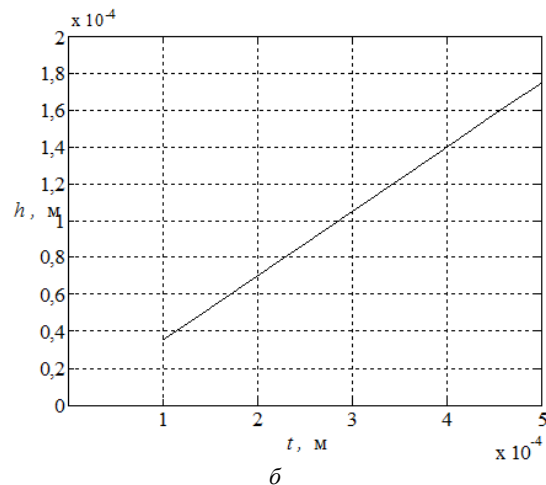
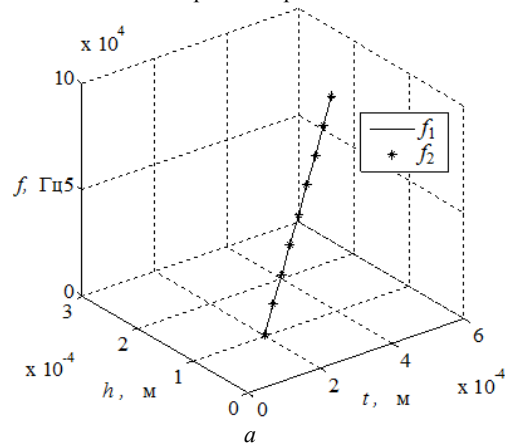


Рис. 6. Соотношение между высотой и толщиной КР, при котором f_1 и f_2 равны (а) и зависимость высоты от толщины в виде: $h \approx 0,35t$ (б)

Исследование влияния измерений конструктивных параметров кольцевого резонатора на амплитуды вторых движений

Возникающие под действием угловой скорости силы Кориолиса деформируют кольцевой резонатор, являясь причиной дополнительного второго движе-

ния. Зная амплитуду второго движения, можно определить направление и величину угловой скорости. Второе радиальное движение кольцевого резонатора зависит от угловой скорости вращения Ω , амплитуды постоянных вибраций A , частоты колебаний и демпфирования γ . Амплитуды вторых движений могут быть определены по формулам [5]

$$\Delta d_Z(\Omega_Z) = \frac{2 \cdot n \cdot \Omega_Z \cdot A}{(n^2 + 1) \cdot \gamma \cdot f_1},$$

$$\Delta d_X(\Omega_X) = \frac{\Omega_X \cdot i \cdot A}{2 \left[1 + \left(\frac{I_X}{t \cdot h} \right) \cdot i^4 \cdot \xi^2 \right] \cdot \gamma \cdot f_2},$$

$$\Delta d_Y(\Omega_Y) = \frac{\Omega_Y \cdot i \cdot A}{2 \left[1 + \left(\frac{I_Y}{t \cdot h} \right) \cdot i^4 \cdot \xi^2 \right] \cdot \gamma \cdot f_2},$$

где A – амплитуда первого радиального движения.

Изменяя геометрические параметры кольцевого резонатора, определим их влияние на вторые движения. Зависимость амплитуды вторых движений КР от угловых скоростей при изменении толщины кольцевого резонатора приведена на рис. 7 для следующих параметров: первое радиальное движение $A = 50$ мкм, модуль упругости (Юнга) $E = 1,65 \cdot 10^{11}$ Па, плотность материала $\rho = 2330$ кг/м³.

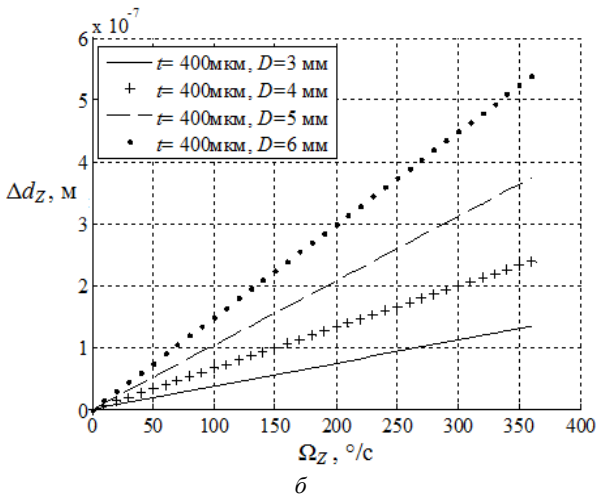
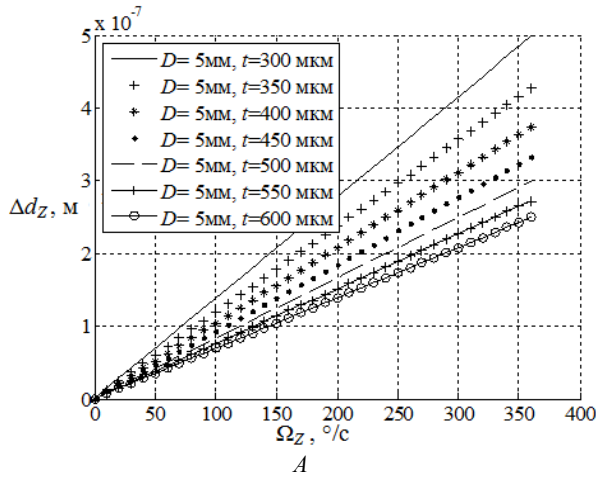


Рис. 7 (начало)

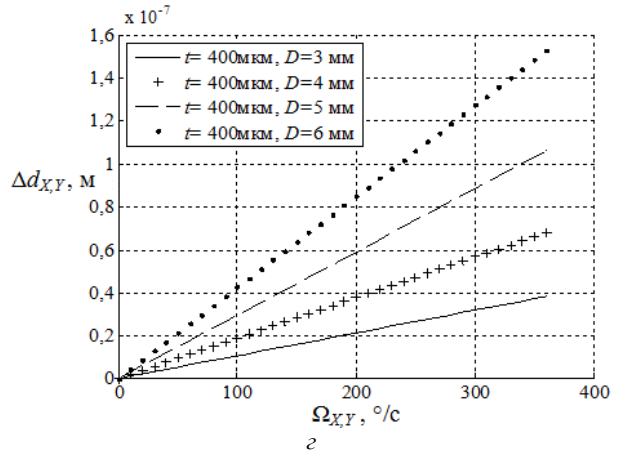
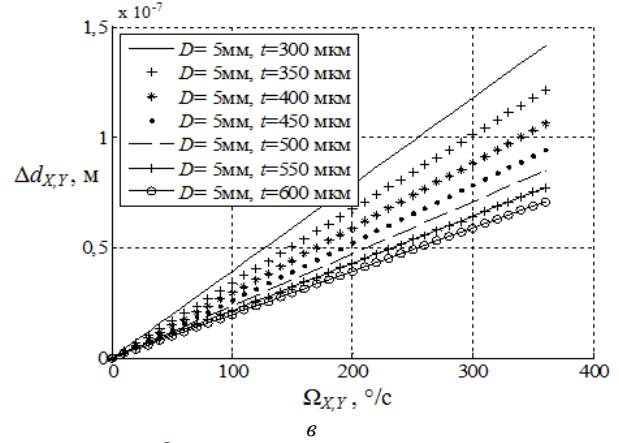


Рис. 7 (продолжение). Зависимость амплитуды вторых движений для Ω_Z (а, б) для Ω_X, Ω_Y (в, г) от угловой скорости при изменении толщины и диаметра кольцевого резонатора

Зазор $d(\Omega) = f(\Omega)$ между призмой и кольцевым резонатором определяется как:

$$d_{\min i}(\Omega) = d_{0i} - \Delta d_i(\Omega).$$

При увеличении угловых скоростей амплитуды изменений величины зазоров увеличиваются, в результате чего амплитуды изменений выходной оптической мощности также увеличиваются.

При этом следует учитывать, что при увеличении второго радиального движения кольцевого резонатора $\Delta d(\Omega)$ происходит уменьшение зазора $d_{\min i}(\Omega)$, что приводит к уменьшению выходной оптической мощности. По амплитуде изменений выходной мощности можно измерять угловые скорости. На рис. 8 приведена зависимость изменения зазора от угловой скорости при изменении толщины резонатора h (рис. 8, а, б для Ω_Z при $d_{0Z} = 650$ нм) и диаметра D (рис. 8, в, г для Ω_X и Ω_Y при $d_{0XY} = 250$ нм).

Изменения величины вторых движений происходят с постоянной частотой, равной собственной частоте колебания ($f_1 = f_2 = 47$ кГц), и приведены на рис. 9. Под действием постоянной угловой скорости $\Omega_X, \Omega_Y, \Omega_Z = 360^\circ/\text{с}$ изменение величины второго радиального движения составляет около 500 нм (для Ω_Z) и 170 нм (для Ω_X и Ω_Y) при следующих параметрах резонатора: диаметр $D = 6$ мм, первое движение $A = 50$ мкм, толщина $t = 400$ мкм и ширина $h = 140$ мкм.

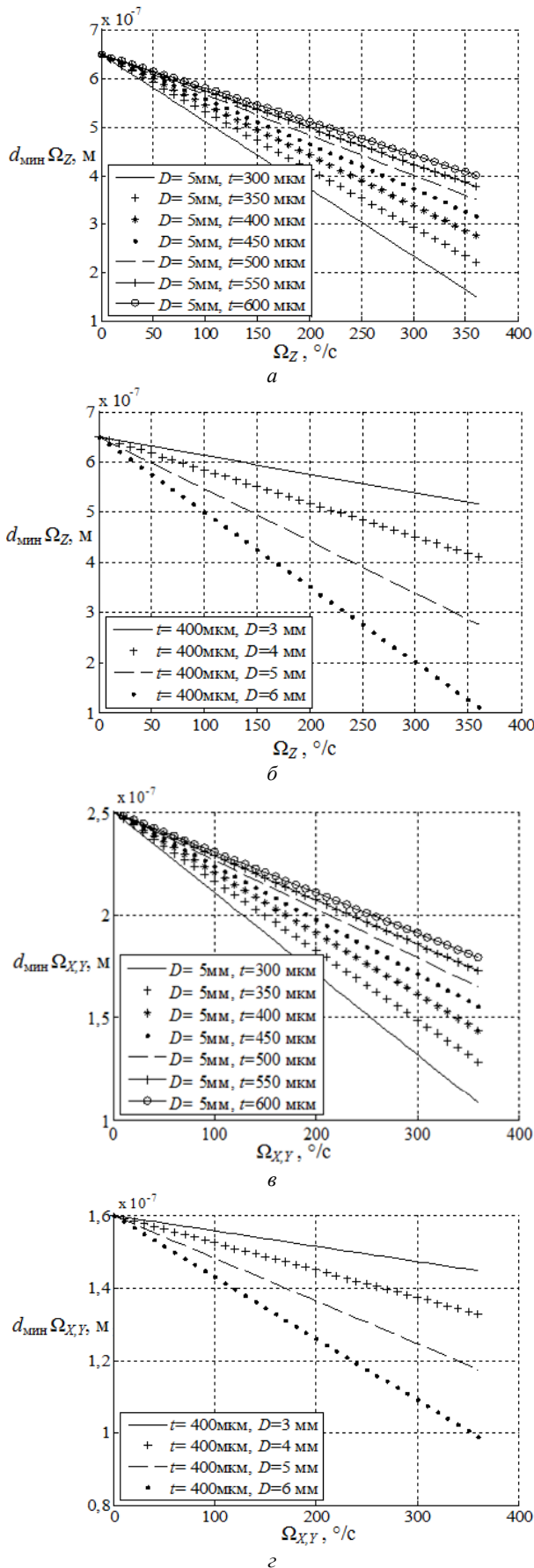


Рис. 8. Величины зазора измеряемых угловых скоростей Ω_Z (а, б), Ω_X и Ω_Y (в, г) при изменении толщины кольцевого резонатора

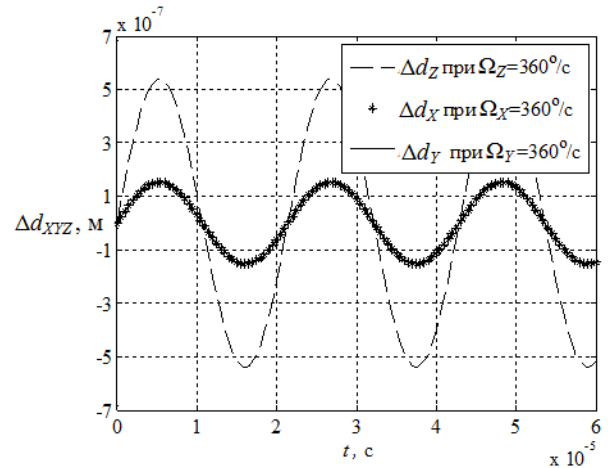


Рис. 9. Временная зависимость вторых движений при постоянных угловых скоростях

При выборе начального зазора $d_{0Z} = 650$ нм и $d_{0XY} = 250$ нм зазоры $d_i(t)$ изменяются от 100 до 1200 нм (для Ω_Z) и от 100 до 400 нм (для Ω_X и Ω_Y) (рис. 10), что соответствует диапазону измерения при использовании оптического туннельного эффекта.

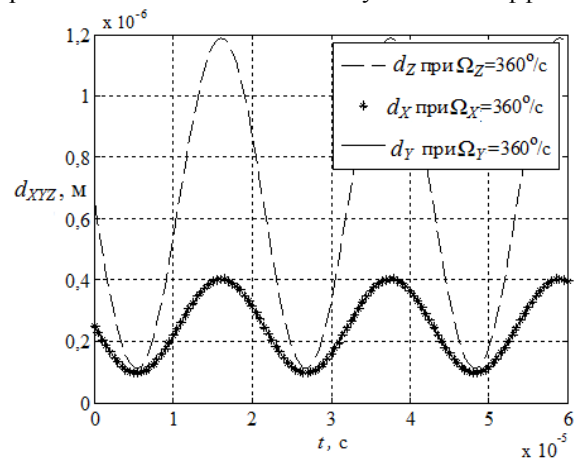


Рис. 10. Зависимость величины зазора от времени при постоянной угловой скорости

Таким образом, целесообразно выбирать радиус кольцевого резонатора r порядка единиц миллиметров при толщине t в сотни микрометров, что обеспечивает необходимую максимальную величину вторых движений и зазора около сотен нанометров при угловых скоростях сотни градусов в секунду.

Функция преобразования трёхосевого волнового оптоэлектронного преобразователя угловой скорости

Считывающие оптические узлы преобразователя угловой скорости представляют собой совокупность источников излучения, призм полного внутреннего отражения (с показателем преломления n_1), кольцевого резонатора, фотоприемников. Изменение мощности выходного излучения каждого канала можно оценить по отражательной способности модулируемой границы сред $R_{\text{мини}}(\Omega) = f[d_{\text{мини}}(\Omega)]$ [6, 7].

Поскольку воздействие угловых скоростей вызывает изменение расстояния между кольцевым резонатором и основанием призмы, функция преобра-

зования первичного преобразователя датчика угловой скорости (ДУС) определяется зависимостью мощности оптического излучения $P_{ФП i} \{R_{мин i} [d_{мин i}(\Omega)]\}$, достигающей фотоприемника, от зазора d . С учетом отражательной способности R , зависящей от зазора d , мощность оптического излучения на фотоприемнике определится как

$$P_{ФП i}(\Omega) = P_{ИИ} \cdot R_{мин i} [d_{мин i}(\Omega)] \cdot K_{потерь}$$

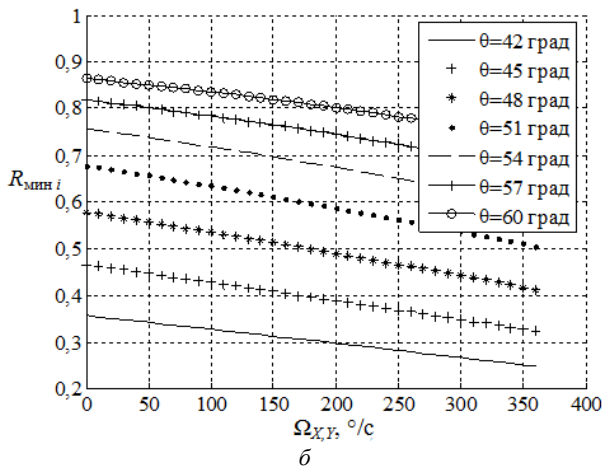
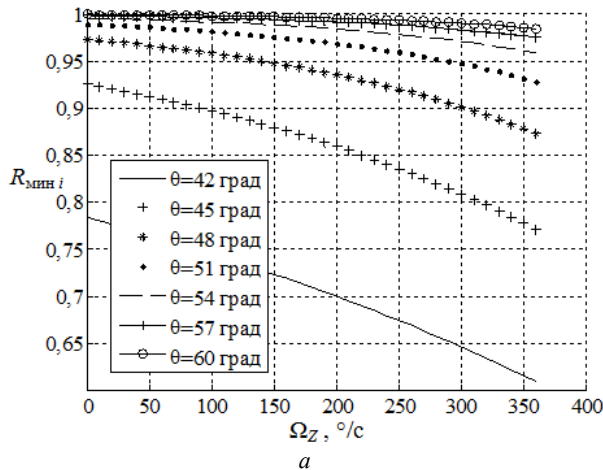


Рис. 11. Зависимость изменения значений отражательной способности для Ω_Z (а) и для Ω_X, Ω_Y (б) от угловых скоростей при различных углах падения

Оптические мощности фотоприемников изменяются в противофазе (рис. 12) при следующих параметрах: мощность источника излучения $P_{ИИ} = 2$ мВт, суммарный коэффициент потерь $K_{потерь} = 0,5$ и действий постоянной угловой скорости $\Omega_X = \Omega_Y = \Omega_Z = 360^\circ/\text{с}$.

Функция преобразования одного узла считывания преобразователя угловой скорости определяется зависимостью выходного напряжения $U_{ВЫХ i}(\Omega) = f(P_{ФП i} \{R_{мин i} [d_{мин i}(\Omega)]\})$ от угловой скорости. Выходное напряжение при использовании преобразователя «ток–напряжение» на основе операционного усилителя с сопротивлением в цепи обратной связи $R_{ОС}$ с учетом тока фотоприемника определится как

$$U_{ВЫХ i}(\Omega) = R_{ОС} \cdot (S_{ФП} \cdot P_{ФП i} \{R_i [d_i(\Omega_{XYZ})]\} + I_T)$$

На рис. 13 изображена зависимость выходного напряжения преобразователя от угловых скоростей (Ω_{XYZ}).

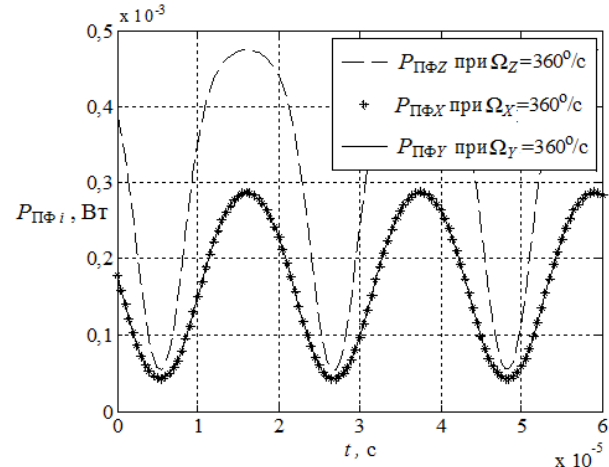


Рис. 12. Зависимость значений мощности фотоприемника от постоянных угловых скоростей

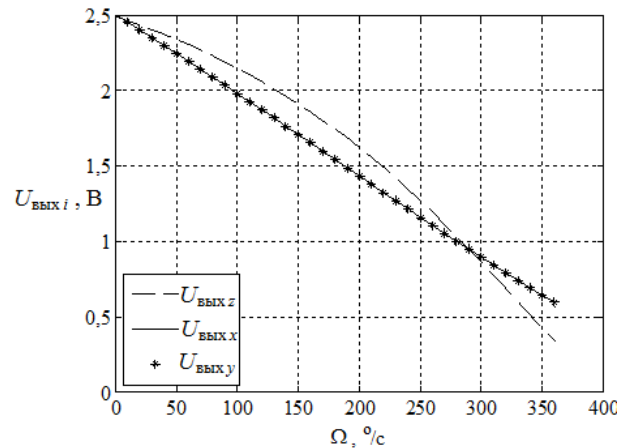


Рис. 13. Зависимость выходного напряжения i -го узла считывания преобразователя от угловых скоростей

Выходные напряжения преобразователя изменяются в противофазе (рис. 14) при следующих параметрах: сопротивление обратной связи $R_{ОС Z} = 22$ кОм и $R_{ОС X} = 10$ кОм, чувствительность фотоприемника $S_{ФП} = 0,3$ и темновой ток $I_T = 0,15$ нА.

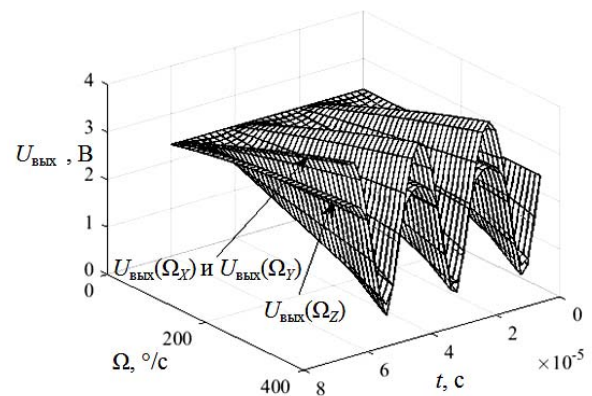


Рис. 14. Определение выходного напряжения i -го узла считывания преобразователя от угловых скоростей и времени

Основные результаты

Исследован трёхосевой волновой оптоэлектронный преобразователь угловой скорости, использующий один кольцевой резонатор. Получено соотношение между толщиной и высотой кольцевого резонатора, обеспечивающее измерение угловой скорости по трем осям с помощью одного кольцевого резонатора и оптического туннелирования.

Разработана функциональная схема преобразователя с шестью узлами считывания и исследовано влияние параметров кольцевого резонатора на характеристики трёхосевого волнового оптоэлектронного преобразователя угловой скорости. Предложена функция преобразования трёхосевого кольцевого преобразователя угловой скорости и получены зависимости оптической мощности фотоприемника, тока фотоприемника и выходного напряжения узлов считывания от угловой скорости.

Определены диапазоны параметров кольцевого резонатора (диаметр КР $d = 3-6$ мм при толщине $t = 300-600$ мкм), обеспечивающие при амплитуде первого движения $A = 10-60$ мкм максимальную величину второго движения (до сотен нанометров), достаточную для обеспечения измерения угловых скоростей по трем осям в сотни градусов в секунду.

Статья подготовлена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-08-00447).

Литература

1. Бусурин В.И. Исследование характеристик кольцевого волнового оптоэлектронного преобразователя угловой скорости / В.И. Бусурин, В.В. Коробков, Ёин Наинг Вин // Мехатроника. Автоматизация. Управление. – 2016. – Т. 17, № 5. – С. 340–346.
2. Gallacher B.J. Principles of a Three-Axis Vibrating Gyroscope / B.J. Gallacher, J.S. Burdess, A.J. Harris // IEEE transactions on aerospace and electronic systems. – 2001. – Т. 37, № 4. – С. 1333–1343.
3. Матвеев В.А. Проектирование волнового твердотельного гироскопа / В.А. Матвеев, В.И. Липатников, А.В. Алехин. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998. – 167 с.
4. Tom Irvine. Ring vibration modes revision D [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.vibrationdata.com/tutorials2/>. – January 26, 2015. – P. 1–15.
5. Eley R. The dynamics of vibrating ring multi axis rate gyroscope/ R. Eley, C.H.J Fox, S. Mc. William // Journal

of Mechanical Engineering Science. – 2000. – Т. 214, № 12. – P. 1503–1513.

6. Бусурин В.И. Оптические и волоконно-оптические устройства и системы / В.И. Бусурин, А.В. Казарьян, Е.С. Неретин. – М.: Изд-во МАИ, 2015. – 112 с.

7. Born M. Principles of Optics / M. Born, E. Wolf. – Oxford: Pergamon Press, 1986. – 854 p.

Бусурин Владимир Игоревич

Д-р техн. наук, профессор каф. 301 «Системы автоматического и интеллектуального управления» Московского авиационного института (Национального исследовательского университета МАИ)
Тел.: +7-916-918-82-26
Эл. почта: vbusurin@mai.ru

Коробков Вадим Владимирович

Канд. техн. наук, доцент каф. 301
Тел.: +7-916-102-23-44
Эл. почта: vvkog@bk.ru

Ёин Наинг Вин

Аспирант каф. 301
Тел.: +7-967-287-15-95
Эл. почта: integratedchip.88@gmail.com

Busurin V.I., Korobkov V.V., Yin Naing Win.

Investigation of the ring resonator parameters influence on the characteristics of the three-axis optoelectronic angular velocity transducer

This article presents the structure and mathematical model of the three-axis photoelectric angular velocity transducer based on the optical tunneling effect (OTE) and then provides the transfer function of the three-axis optoelectronic angular velocity transducer. The influence of the ring resonator parameters to the natural frequency and the secondary displacement of the ring resonator is investigated. The influence of the optoelectronic module on the total internal reflectivity, the optical power of photo receiver and the output voltage is described also.

Keywords: Ring wave resonator, three axis optoelectronics transducer, angular velocity, optical tunneling, natural frequency of vibration, conversion function, gap, radial displacement.

УДК 621.37

А.В. Филатов, Н.Ю. Белов, С.Е. Тарасов, Н.А. Филатов, А.Г. Лоцилов

Две модели измерителя модуля коэффициента отражения в широкой полосе частот методами микроволновой радиометрии

Рассмотрены две модели широкополосного измерителя интегрального значения модуля коэффициента отражения с использованием шумовых сигналов низкой интенсивности, принцип работы которых основан на одной из модификаций нулевого метода измерений. В результате моделирования определено влияние на точность измерений неидеальности узлов во входном тракте и получены выражения для выбора параметров узлов с учетом заданной погрешности измерений. Показано, что основная погрешность возникает на краях диапазона измерения и имеет разные знаки для минимального и максимального значений. Предложена вторая модель измерителя с калибровкой в одной точке. Тогда погрешность в конце измерительной шкалы принимает нулевое значение, а в начале – связана со степенью развязки направленного ответвителя.

Ключевые слова: микроволновая радиометрия, коэффициент отражения.

doi: 10.21293/1818-0442-2017-20-4-50-54

В современной медицинской практике начинают широко использоваться новые физические принципы построения биомедицинской аппаратуры, связанные с изучением физических полей и излучений человека (медицина будущего) [1]. Для дистанционного измерения глубинной температуры тела человека и животных используются микроволновые радиометрические системы [2, 3]. При неинвазивном восстановлении профиля глубинной температуры решением обратных задач требуются знания толщины слоев кожи и жира. В работах [4, 5] показано, что по измерениям модуля коэффициента отражения на нескольких частотах можно оценить параметры трехкомпонентной среды кожа–жир–мышцы биологической ткани. Знания о модуле коэффициента отражения в микроволновом диапазоне и широкой полосе частот требуются и в других сферах исследовательской деятельности. Например, при определении отражательных свойств искусственных и естественных покрытий и материалов различных конструкций [6], в ходе калибровки тепловых широкоапертурных излучателей для обеспечения единства измерений радиоярких температур космических и земных объектов [7, 8] и т.д.

В работах [9, 10] рассмотрен простой измеритель интегрального значения модуля коэффициента отражения в микроволновом диапазоне и широкой полосе частот с использованием шумового сигнала низкой интенсивности, принцип работы которого основан на одной из модификаций нулевого метода измерений (нулевого баланса) [11]. Применение данного принципа позволило, с одной стороны, повысить точность измерений, с другой – значительно упростить конструкцию измерителя и реализовать его в виде переносного, портативного прибора.

Во входной части измерителя, упрощенная схема которой представлена на рис. 1, сигнал опорного генератора шума (ГШ) с эффективной температурой шумов $T_{\text{ГШ}}$ подвергается двум видам импульсной модуляции – амплитудной и широтной. Автоматической регулировкой длительности широтного сигнала

в измерителе настраивается нулевой баланс на входе первого усилителя:

$$\beta k \Delta f T_{\text{ГШ}} t_{\text{ШИМ}} = \beta k \Delta f T_{\text{ГШ}} R t_{\text{АИМ}}, \quad (1)$$

где $t_{\text{АИМ}}$ и $t_{\text{ШИМ}}$ – длительности сигналов управления амплитудной и широтной импульсными модуляциями соответственно, $t_{\text{АИМ}}$ изменяется по закону меандр; $t_{\text{ШИМ}}$ – в пределах от 0 до $t_{\text{АИМ}}$; β – коэффициент переходного ослабления направленного ответвителя НО; R – коэффициент отражения по мощности в месте приложения антенны A к объекту исследования; k – постоянная Больцмана; Δf – полоса рабочих частот измерителя. В это равенство не входят сигналы, первый из которых поступает через антенну от объекта исследования, а второй формируется из собственных шумов измерителя. Они не подвергаются модуляции и в ходе дальнейшей последетекторной обработки исключаются.

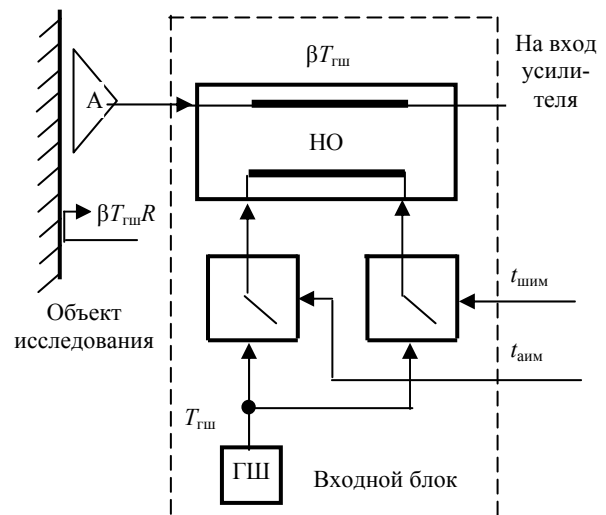


Рис. 1. Упрощенная структурная схема входного блока радиометрического измерителя модуля коэффициента отражения

Из (1) определяем модуль коэффициента отражения, который связан с длительностью широтно-

импульсного сигнала и, следовательно, через этот сигнал модуль определяется косвенным способом:

$$R = t_{\text{шим}} / t_{\text{аим}} \quad (2)$$

Как следует из (2), когда измеритель сбалансирован, его показания не зависят от дрейфа и низкочастотных флуктуаций сигнала опорного генератора шума. Основное требование к этому сигналу заключается в том, что он должен сохранять свои параметры на периоде амплитудно-импульсной модуляции.

При выводе (2) использовался метод абстрагирования, когда элементы, используемые во входном узле измерителя, такие как антенна, направленный ответвитель, считались идеальными и пренебрегались потери, возникающие в фидере и других линиях и соединениях.

Целью данной работы является рассмотрение влияния неидеальности узлов во входном тракте измерителя на точность измерения модуля коэффициента отражения, получение расчетных соотношений для выбора параметров этих узлов с учетом заданной погрешности измерений, анализ и разработка новой модели измерителя для достижения максимальной точности измерений.

На рис. 2 приведен фрагмент структурной схемы рассмотренного выше входного узла измерителя, в которой учтены конечная направленность ответви-

теля, потери в антенне аппликаторного типа, расположенной непосредственно на объекте исследования и в фидере, соединяющем антенну с направленным ответвителем. Эти элементы вносят основную погрешность в измерения. Согласование антенны с фидером вносит меньшую погрешность, если КСВН не превышает 1,5, и не учитывалось при моделировании.

Математическая модель (балансное соотношение, устанавливаемое и поддерживаемое в радиометрическом измерителе петлей обратной связи) в этом случае будет иметь вид

$$[k\Delta f T_{\text{гш}} \beta_1 \alpha^2 \eta^2 (1 - \beta - \beta_1) R + k\Delta f T_{\text{гш}} \beta] t_{\text{шим}} = [k\Delta f T_{\text{гш}} \beta \alpha^2 \eta^2 (1 - \beta - \beta_1) R + k\Delta f T_{\text{гш}} \beta_1] t_{\text{аим}}, \quad (3)$$

где β и β_1 – коэффициенты переходного ослабления противонаправленного ответвителя при поступлении сигнала генератора шума $T_{\text{гш}}$ из основного канала во вспомогательный в прямом и обратном направлениях, $\beta > \beta_1$ (для идеального направленного ответвителя $\beta_1 = 0$); α – коэффициент затухания сигнала в фидере, равен единице в случае отсутствия потерь в линии и нулю при полном ослаблении сигнала; η – коэффициент полезного действия антенны, характеризующий возникающие в ней активные потери.

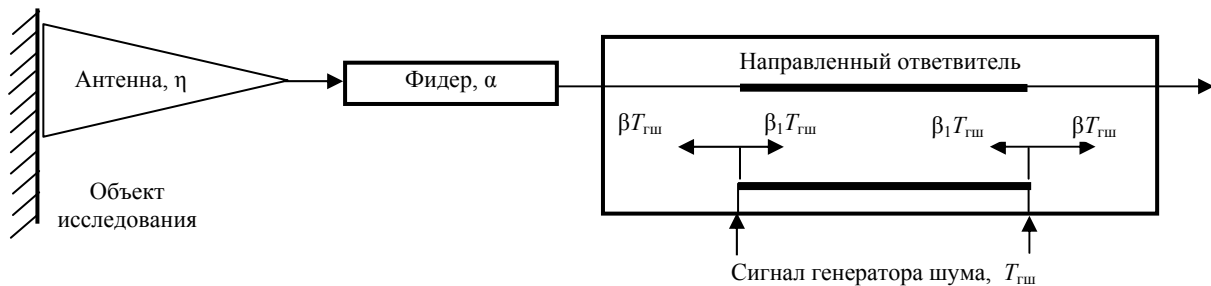


Рис. 2. Фрагмент структурной схемы входного узла измерителя

После простых преобразований балансного соотношения (3) относительно коэффициента отражения получим

$$R = \frac{\beta t_{\text{шим}} - \beta_1 t_{\text{аим}}}{\beta_1 t_{\text{аим}} - \beta t_{\text{шим}}} \times \frac{1}{\alpha^2 \eta^2 (1 - \beta - \beta_1)} \quad (4)$$

Если элементы входного тракта имеют идеальные характеристики, т.е. $\beta_1 = 0$, $\alpha = \eta = 1$, и если пренебречь потерями сигнала в результате его ответвления из вспомогательного канала ответвителя в основной, получим (2).

В балансном выражении (3) не учитываются интерференционные явления сигнала генератора шума, возникающие на входе усилителя при конечной развязке направленного ответвителя ($\beta_1 \neq 0$). Это связано малым значением эффективного времени автокорреляции, которое обратно пропорционально ширине полосы частот и для широкополосного сигнала составляет незначительную величину.

В ходе поискового эксперимента было установлено, что максимальные погрешности определения

R возникают на краях диапазона измерения, когда длительность $t_{\text{шим}}$ принимает значение, равное нулю и $t_{\text{аим}}$, причем при $t_{\text{шим}} = 0$ погрешность имеет отрицательный знак, а при $t_{\text{шим}} = t_{\text{аим}}$ – положительный. Для этих двух значений длительности $t_{\text{шим}}$ коэффициент отражения равен

$$R_{(0)} = -\frac{\beta_1}{\beta} \times \frac{1}{\alpha^2 \eta^2 (1 - \beta - \beta_1)} \quad (5)$$

для $t_{\text{шим}} = 0$;

$$R_{(1)} = \frac{1}{\alpha^2 \eta^2 (1 - \beta - \beta_1)} \quad (6)$$

для $t_{\text{шим}} = t_{\text{аим}}$.

Так как выполняется условие $\beta_1 < \beta$, наибольшая погрешность имеет место для $R_{(1)}$:

$$\Delta_{(1)} = R_{(1)} - 1 \quad (7)$$

После подстановки (7) в (6) для произведения $\alpha^2 \eta^2$ получим

$$\alpha^2 \eta^2 = \frac{1}{(1 - \beta - \beta_1)(\Delta_{(1)} + 1)} \quad (8)$$

Для (8) выполняется условие $\alpha^2\eta^2 < 1$, так как $(\Delta_{(1)}+1) > 1$, а $(1 - \beta - \beta_1) < 1$, тогда значение $(1 - \beta - \beta_1)$ должно находиться в интервале

$$\frac{1}{\Delta_{(1)}+1} < (1 - \beta - \beta_1) < 1. \quad (9)$$

При выборе $(1 - \beta - \beta_1)$ необходимо пользоваться правилом: чем ближе значение этого параметра к единице, тем большие потери могут иметь фидер и антенна, при которых выполняются требования к заданной погрешности измерений.

Рассмотрим пример расчета параметров узлов входного тракта с учетом полученных формул. Примем погрешность измерения коэффициента отражения равной $\Delta_{(1)} = 0,1$. Тогда согласно (9) значение $(1 - \beta - \beta_1)$ должно находиться в пределах от 0,909 до 1. Пусть $(1 - \beta - \beta_1) = 0,982$. Откуда $\beta + \beta_1 = 0,0182$. Принимаем коэффициенты переходного ослабления направленного ответвителя равными $\beta = 0,018$ (-17,45 дБ) и $\beta_1 = 0,0002$ (-36,99 дБ). Из (8) $\alpha^2\eta^2 = 0,926$. Если коэффициент полезного действия антенны принять равным $\eta = 0,98$, то $\alpha = 0,982$ (-0,081 дБ). Для приведенного примера погрешность коэффициента отражения в начале шкалы, рассчитываемая по формуле (5), равна -0,012 и не выходит за рамки заданной погрешности.

Полученные значения для развязки в направленном ответвителе, потерь в фидере, принятого значения коэффициента полезного действия широкополосной антенны предполагают применение прецизионных СВЧ-узлов с достаточно высокими показателями. Если заданную погрешность измерений продолжать уменьшать, тогда требования к названным узлам еще более возрастают.

Таким образом, к достоинству данной схемы можно отнести то, что после изготовления измерителя он не требует калибровки, а недостатком – использование во входном узле качественных элементов (ответвителя с высокой степенью направленности, соединение антенны с направленным ответвителем с низкими потерями, широкополосную антенну с высоким коэффициентом полезного действия). Снижение требований к узлам приведет к росту погрешности.

В ходе последующего анализа был сделан вывод, что основная погрешность в измерителе возникает из-за достаточно сильного ослабления сигнала генератора шума, распространяющегося после ответвителя в сторону антенны, и последующего его отражения от объекта исследования. Отсюда как раз и следуют специальные жесткие требования к используемым узлам, чтобы выполнить балансное соотношение (3).

На рис. 3 приведена схема измерителя модуля коэффициента отражения, свободная от данного недостатка. В схему добавлен аттенуатор, ослабляющий сигнал генератора шума в случае его распространения после направленного ответвителя в сторону усилителя.

С учетом ослабления сигнала генератора шума в аттенуаторе с коэффициентом γ балансное равенство (3) примет вид

$$[k\Delta f T_{\text{ГШ}} \beta_1 \gamma \alpha^2 \eta^2 (1 - \beta - \beta_1) R + k\Delta f T_{\text{ГШ}} \beta \gamma] t_{\text{шмм}} = \\ = [k\Delta f T_{\text{ГШ}} \beta \alpha^2 \eta^2 (1 - \beta - \beta_1) R + k\Delta f T_{\text{ГШ}} \beta_1] t_{\text{аим}}. \quad (10)$$

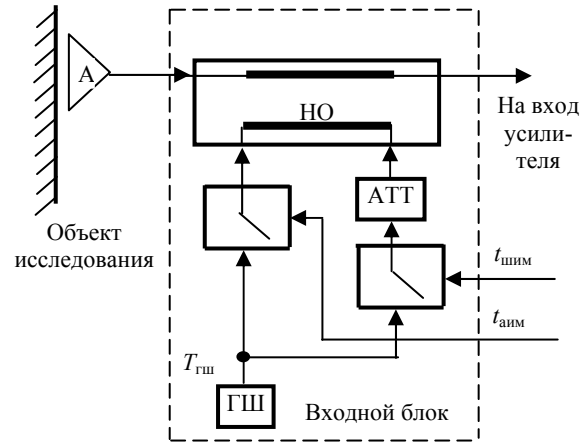


Рис. 3. Схема измерителя модуля коэффициента отражения с регулируемым аттенуатором

Откуда

$$R = \frac{\gamma \beta t_{\text{шмм}} - \beta_1 t_{\text{аим}}}{\beta t_{\text{аим}} - \gamma \beta_1 t_{\text{шмм}}} \times \frac{1}{\alpha^2 \eta^2 (1 - \beta - \beta_1)}. \quad (11)$$

Соответственно коэффициент отражения на границах шкалы измерений будет равен

$$R_{(0)} = -\frac{\beta_1}{\beta} \times \frac{1}{\alpha^2 \eta^2 (1 - \beta - \beta_1)} \quad (12)$$

для $t_{\text{шмм}} = 0$;

$$R_{(1)} = \frac{\gamma \beta - \beta_1}{\beta - \gamma \beta_1} \times \frac{1}{\alpha^2 \eta^2 (1 - \beta - \beta_1)} \quad (13)$$

для $t_{\text{шмм}} = t_{\text{аим}}$.

Коэффициент затухания аттенуатора входит в (13) для $R_{(1)}$. Следовательно, настройкой γ (в процессе калибровки) можно получить $R_{(1)} = 1$, т.е. устранить погрешность измерений для максимальной границы шкалы. Подставляя в (13) вместо $R_{(1)}$ единицу и решая равенство относительно коэффициента ослабления сигнала аттенуатором, получим

$$\gamma = \frac{\beta[\alpha^2 \eta^2 (1 - \beta - \beta_1)] + \beta_1}{\beta + \beta_1[\alpha^2 \eta^2 (1 - \beta - \beta_1)]}. \quad (14)$$

Для примера, задаваясь значениями $\alpha = 0,891$ (-0,5 дБ), $\eta = 0,95$, $\beta = 0,1$, $\beta_1 = 0,005$, получим $\gamma = 0,694$. Таким образом, настроив аттенуатор на полученное значение коэффициента ослабления сигнала генератора шума, устраним погрешность в конце шкалы преобразования. Регулировка аттенуатора осуществляется в процессе калибровки. Для этого к антенне прикладывается идеальный отражатель (гладкий металлический лист) и длительность широтно-импульсного сигнала устанавливается равной длительности импульса амплитудно-импульсной модуляции, $t_{\text{шмм}} = t_{\text{аим}}$. Регулировку производят до установления нулевого баланса (10), который фиксируется на выходе измерителя.

Погрешность в начале шкалы преобразования не зависит от γ и, как следует из (12), определяется только отношением коэффициентов переходного ослабления ответвителя в прямом и обратном направлениях:

$$\frac{\beta}{\beta_1} = \frac{1}{R_{(0)}\alpha^2\eta^2(1-\beta-\beta_1)}. \quad (15)$$

Решая (15) относительно β_1 и учитывая, что $\beta^2 \ll \beta \ll D$, где $D = 1/R_{(0)}\alpha^2\eta^2$, получим

$$\beta_1 \cong \frac{\beta}{D}. \quad (16)$$

Если принять погрешность в начале измерительной шкалы равной 0,1, тогда для двух значений β , равных 0,1 (-10 дБ) и 0,05 (-13 дБ), из (13) получим $\beta_1 = 0,0072$ (-21,43 дБ) и 0,0036 (-24,45 дБ). Для другого значения погрешности, например 0,05, при тех же значениях коэффициента переходного ослабления β получим для β_1 0,0036 и 0,0018, что соответственно составляет -24,43 и -27,47 дБ. Отсюда следует, что погрешность в начале шкалы преобразования определяется величиной развязки в направленном ответвителе и при ее увеличении (уменьшении β_1) снижается.

Таким образом, рассмотрено влияние на точность измерений неидеальности узлов во входном тракте измерителя интегрального значения модуля коэффициента отражения в микроволновом диапазоне и широкой полосе частот с использованием шумового сигнала низкой интенсивности, принцип работы которого основан на одной из модификаций нулевого метода измерений. Получены выражения для выбора параметров узлов с учетом заданной погрешности измерений. Проведен анализ и разработана новая модель измерителя для достижения максимальной точности измерений.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 15-07-04971).

Литература

1. Годик Э.Э. Человек «глазами радиопроизводителя» / Э.Э. Годик, Ю.В. Гуляев // Радиотехника. – 1991. – № 8. – С. 51–62.
2. Вайсблат А.В. Медицинский радиотермометр РТМ-01-РЭС // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. – 2001. – № 8. – С. 3–9.
3. Asimakis N.P. Non-invasive microwave radiometric system for intracranial applications. A study using the conformal L-notch microstrip patch antenna / N.P. Asimakis, I.S. Karanasiou, N.K. Uzunoglu // Progress In Electromagnetics Research. – 2011. – Vol. 117. – P. 83–101.
4. Маречек С.В. Возможности оценки приповерхностной структуры биологической ткани по измерению коэффициента отражения на отдельных частотах СВЧ-диапазона / С.В. Маречек, В.М. Поляков // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. – 2005. – № 11–12. – С. 4–11.
5. Маречек С.В. Оценка толщины приповерхностных слоев биологической ткани по измерению комплексного коэффициента отражения на одной частоте СВЧ-диапа-

зона / С.В. Маречек, В.М. Поляков, Ю.Г. Тищенко // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2009. – № 1. – С. 16–19.

6. Мироньев А.С. Широкополосные измерения отражательных свойств искусственных и естественных радиоматериалов / А.С. Мироньев, А.В. Клоков, А.В. Горст // 24-я Междунар. Крым. конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо 2014). Севастополь, 7–13 сентября 2014 г.: матер. конф. – Севастополь: Вебер, 2014. – Т. 2. – С. 702–703.

7. Арсаев И.Е. Метод и аппаратура для прецизионных измерений коэффициента поглощения микроволновых широкоапертурных излучателей в свободном пространстве / И.Е. Арсаев, Э.Ф. Юрчук // Измерительная техника. – 2011. – № 3. – С. 62–66.

8. Бутакова С.В. Апертурные шумовые излучатели в микроволновой радиометрии // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. – 1997. – № 4. – С. 3–26.

9. Filatov A.V. A Radiometer of the Reflection Coefficient Magnitude // Instruments and Experimental Techniques. – 2016. – Vol. 59, No. 1. – P. 100–103.

10. Пат. 2 439 595 РФ, МПК G 01 R 29/08. Радиометрический измеритель коэффициента отражения / А.В. Филатов (РФ), – № 2 010 132 764 / 28; заявл. 04.08.10; опубл. 10.01.12. Бюл. № 1. – 4 с.

11. Filatov A.V. Application Concept of Zero Method Measurement in Microwave Radiometers // Modern Instrumentation. – 2015. – Vol. 4, No. 3. – P. 19–31.

Филатов Александр Владимирович

Д-р техн. наук, профессор каф. телекоммуникаций и основ радиотехники (ТОР) ТУСУРа
Тел.: +7-952-899-96-41
Эл. почта: filsash@mail.ru

Белов Никита Юрьевич

Магистрант каф. ТОР ТУСУРа
Тел.: +7-929-370-99-96
Эл. почта: nikitabelov1988@mail.ru

Тарасов Сергей Евгеньевич

Студент каф. радиотехнических систем ТУСУРа
Тел.: +7-23-427-21-54
Эл. почта: sergey-tarasov1996@mail.ru

Филатов Николай Александрович

Программист Института физики
Национального исследовательского
Томского политехнического университета
Тел.: +7-952-804-66-64
Эл. почта: infrombox@yandex.ru

Лоцилов Антон Геннадьевич

Канд. техн. наук, зав.каф. конструирования узлов и деталей радиоэлектронной аппаратуры (КУДР) ТУСУРа, начальник СКБ «Смена»
Тел.: +7-906-947-69-20
Эл. почта: yogl@mail.ru

Filatov A.V., Belov N.Ju., Tarasov S.E.,
Filatov N.A., Loshchilov A.G.

Two models of the reflection coefficient modulus meter in a wide frequency band using microwave radiometry

Two models of a broadband meter of the integral value of the reflection coefficient modulus using low-intensity noise signals are considered, which operation principle is based on one of the modifications of the zero measurement method. As a result of the simulation, the effect on the accuracy of measurements of the non-ideality of nodes in the input path is

determined and expressions are obtained for selecting the parameters of the nodes with allowance for a given measurement error. It is shown that the main error occurs at the edges of the measuring range and has different signs for the minimum and maximum values. A second model of a meter with a calibration at one point is proposed. Then, the error at the end of the measuring scale assumes a zero value, and at the beginning it is related to the degree of isolation of the directional coupler.

Keywords: microwave radiometry, reflection coefficient.

УДК 621.375:621.382

В.А. Рыжов, А.В. Смуров

Использование условий инвариантности схемных функций для синтеза активных цепей

Использование свойств инвариантности при синтезе активных цепей широко применяется в схемотехнике. Наибольшее распространение данный способ приобрел в цепях с операционными усилителями. В работе представлено несколько реализаций корректоров и гармонических генераторов, которые по ряду свойств расширяют возможности разработчика радиоэлектронных средств.

Ключевые слова: многополюсный операционный усилитель, свойства инвариантности, модели активных цепей, регулируемые гармонические генераторы.

doi: 10.21293/1818-0442-2017-20-4-55-58

Свойства инвариантности схемных функций активных цепей позволяют создавать перспективные модели и технические решения, обеспечивающие уникальные характеристики. Использование данного метода позволило разработать специализированные схемные реализации, которые могут быть использованы в современной схемотехнике и радиотехнике. Несмотря на достаточно глубокие исследования в этом направлении, и в настоящее время данная тема является актуальной [1–3]. В работе представлены несколько полезных моделей, которые обладают принципиально новыми возможностями.

Инвариантность рассматривается как свойство цепей, в которых схемные функции определенного вида не зависят от ряда параметров (элементов или многополюсников), входящих в общую схему активной цепи. К основному критерию обеспечения инвариантности относят предельные параметры активных элементов. К ним относят коэффициенты передачи многополюсных операционных усилителей по напряжению $MOYU$ или току $MOYI$, входные или выходные сопротивления усилителей. Как правило, коэффициенты усиления принимаются за бесконечные значения.

Для общности результатов рассмотрим модель цепи с МОУ, которая представлена на рис. 1.

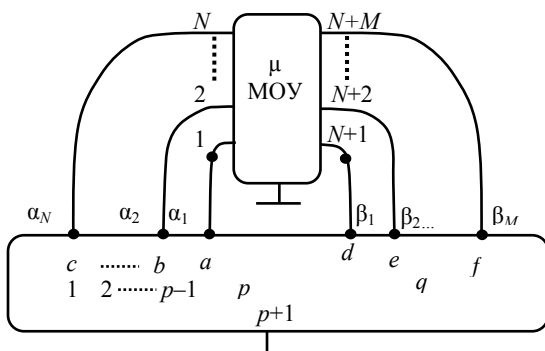


Рис. 1. Общая схема активной цепи с многополюсным операционным усилителем с коэффициентом передачи μ

Выходные токи $MOYI$ и напряжения $MOYU$ в общем случае не определены и зависят от параметров внешней цепи, к которой подключен МОУ. Коэффициенты $\alpha_i, \beta_j (i=1, 2, \dots, N; j=N+1, N+2,$

$\dots, N+M)$ в принципе могут иметь различную физическую интерпретацию. В простейшем случае они могут учитывать знак преобразования в суммах либо принимать значение ноль, что соответствует отсутствию входной или выходной переменной (отсутствие входного или выходного узла). В данной работе рассматривается цепь, в которой, пассивная подсхема разбита на два многополюсника A и D . От характера соединения последних с МОУ возникает несколько свойств инвариантности.

Предположим, что МОУ обладает бесконечным коэффициентом преобразования – усиления ($\mu \rightarrow \infty$), тогда для схемы, представленной на рис. 2, параметры дополнительного многополюсника D не войдут в выражения для передаточных функций.

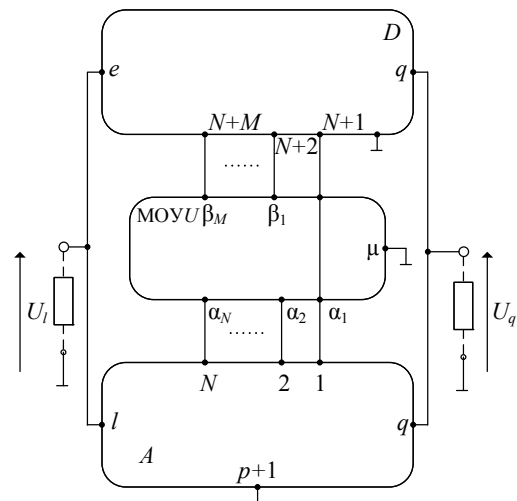


Рис. 2. Схема МОУ с основным – A и D – дополнительным многополюсниками

Действительно, по формуле Мезона [4] для направленных графов можно записать:

$$K_{lq} = \frac{K_{lq}^A + K_{lq}^D + \sum_{i=1}^N K_{li} + \mu \times \sum_{i=1}^N \alpha_i K_{li}^A \times \sum_{j=1}^M \beta_j K_{(N+j)q}^D}{1 - \sum_{i=1}^N K_{qi}^A - \mu \times \sum_{i=1}^N \alpha_i K_{qi}^A \times \sum_{j=1}^M \beta_j K_{(N+j)q}^D};$$

$$K_{ql} = \frac{K_{ql}^A + K_{ql}^D + \sum_{i=1}^N K_{qi} + \mu \times \sum_{i=1}^N \alpha_i K_{qi}^A \times \sum_{j=1}^M \beta_j K_{(N+j)l}^D}{1 - \sum_{i=1}^N K_{li}^A - \mu \times \sum_{i=1}^N \alpha_i K_{li}^A \times \sum_{j=1}^M \beta_j K_{(N+j)l}^D}.$$

При $\mu \rightarrow \infty$ получаем:

$$K_{lq} = -\frac{\sum_{i=1}^N \alpha_i K_{li}^A}{\sum_{i=1}^N \alpha_i K_{qi}^A}, \quad K_{ql} = -\frac{\sum_{i=1}^N \alpha_i K_{qi}^A}{\sum_{i=1}^N \alpha_i K_{li}^A},$$

т.е. коэффициенты передачи взаимнообратны, не зависят от параметров нагрузок как по току, напряжению, так и по мощности.

На рис. 3 отображена упрощенная модель, реализующая передачу энергии в двух направлениях – от узла l к узлу q и наоборот.

$$K_{lq} = -\frac{Y_{12}^1}{Y_{21}^2}, \quad K_{ql} = -\frac{Y_{21}^2}{Y_{12}^1}.$$

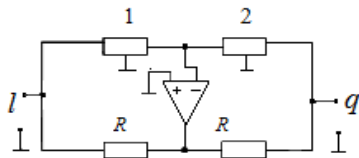


Рис. 3. Практическая схема корректора-компенсатора

Обратимость предполагает выполнение условий $Y_{12}^1 = Y_{21}^2$, цепь в целом симметрична и не создает затухания. Данный факт позволяет проектировать корректоры-компенсаторы АЧХ- и ФЧХ-искажений, в которых используются одинаковые четырехполюсники 1 и 2, и в зависимости от направления передачи цепь обратной связи компенсирует цепь прямого включения. Таким образом, для обеспечения функций коррекции достаточно в цепь обратной связи добавить такой же четырехполюсник, что удобно для практического использования. Следует отметить, что предложенный способ отличается от классического принципа коррекции, когда корректор подключается к искажающей цепи каскадно и при этом исчезает необходимость синтеза (не всегда возможного) схемы корректора [6].

В реальных случаях, с учетом возможностей современной микроэлектроники, необходима проверка устойчивости, а практическое приложение последних может быть расширено при использовании широкополосных ОУ [2–5].

Разработка моделей с переменными параметрами

В данных реализациях основная цель – уменьшение количества ОУ и регулирующих элементов. Модификации реализаций в общем случае рассмотрены на рис. 4, а, б.

Частные решения представлены схемными преобразованиями на рис. 4, в, г, в которых между двумя многополюсниками A и D подключен простейший трехполюсник. В результате простейших преобразований один из побочных элементов «переносится» в дополнительный многополюсник и, как было показано выше, не окажет влияния на схемные функции цепи в целом.

Данное свойство позволило разработать новые модели гармонических генераторов на мосте Вина с одним ОУ, в которых возникает возможность регулировки смежных проводимостей моста с помощью

одного резистора. Заметим, что схемы, известные авторам, обладающие подобными возможностями, реализуются только на двух ОУ [7].

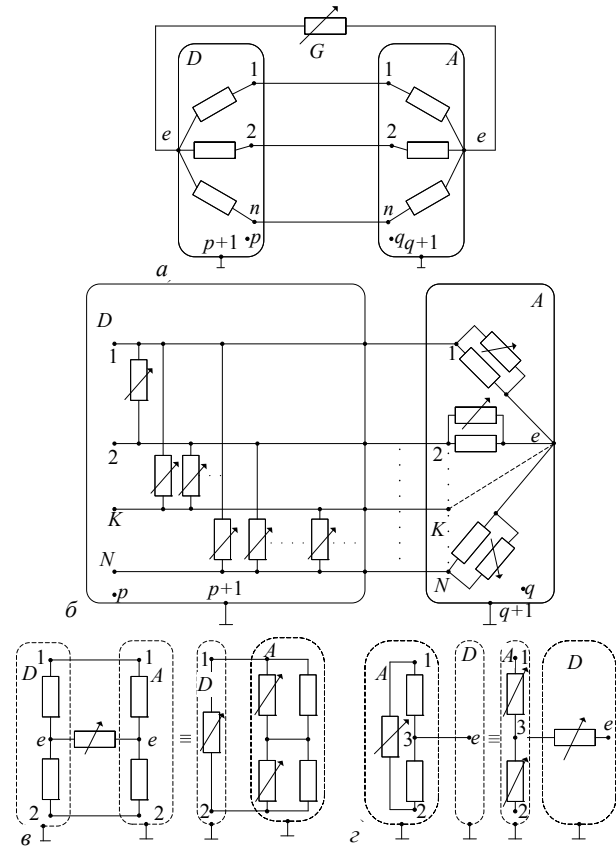


Рис. 4. Эквивалентные преобразования в регулируемых цепях

Рассмотрим общую модель активного моста с дифференциальным ОУ, изображенную на рис. 5.

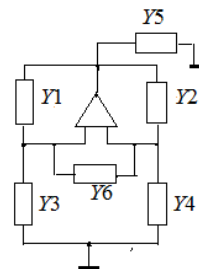


Рис. 5. Иллюстрация преобразований регулирования

Использование свойств инвариантности при синтезе подобных решений сводится к рациональному подключению переменного резистора, в этом случае возникает возможность регулировки смежных проводимостей моста при соблюдении баланса характеристического многочлена.

Характеристический многочлен данной цепи, при $\mu \rightarrow \infty$ определяется выражением

$$D = Y_2 Y_3 - Y_1 Y_4.$$

В силу свойств инвариантности в это выражение не входят проводимости Y_5 и Y_6 . Данное свойство можно использовать для одновременного управления двумя сопряженными плечами моста с

помощью одного элемента. Для этого достаточно к любым трем узлам моста подключить трехполюсник с одним управляющим резистором, представленным на рис. 4, в.

Очевидно, что один из регулируемых параметров данной схемы войдет в состав Y_5 или Y_6 , а два других обеспечат синхронное управление плечами моста. Схемы, полученные таким образом, представлены на рис. 6, № 1–4.

Генераторы (на одном ОУ с регулировкой одним резистором) удовлетворяют важным требованиям, предъявляемым, в частности, к автономным радиотехническим средствам по минимизации энергетических затрат и количества органов управления.

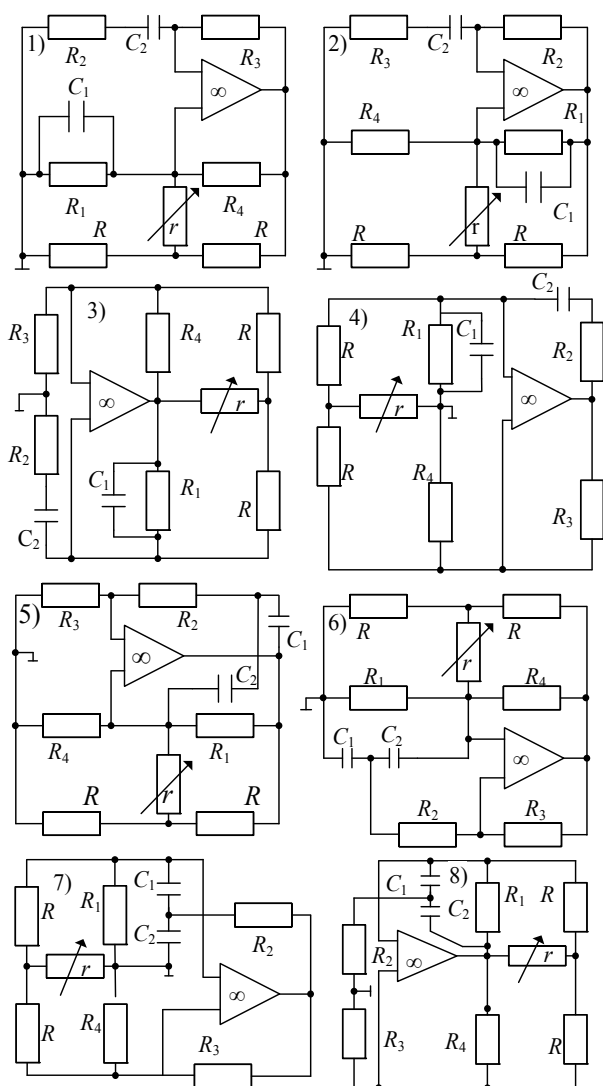


Рис. 6. Схемы генераторов с одним управляющим резистором

Для реализаций, представленных на рис. 6, схемы № 1–4, справедливо выражение

$$D(p) = p^2 + p \left[\frac{G'_1}{C_1} + \frac{G_2}{C_2} - \frac{G_2 G'_4}{G_3 C_2} \right] + \frac{G_2 G'_1}{C_1 C_2},$$

где

$$G'_1 = G_1 + \left(\frac{G}{r} \right) / \left(\frac{1}{r} + 2G \right); \quad G'_4 = G_4 + \left(\frac{G}{r} \right) / \left(\frac{1}{r} + 2G \right).$$

Очевидно, что при $G_4 - G_1 = G_2$; $C_1 = C_2$ все эти схемы обеспечивают генерацию гармонических колебаний с частотой

$$\omega_0^2 = \frac{1}{C^2} G \left(G_1 + \frac{G/r}{1/r + 2G} \right).$$

В данных схемах обеспечивается перестройка частоты генерации, при постоянном, не зависящем от параметров дополнительной трехполюсной цепи условии стационарности.

Вышеописанный метод можно использовать и для регулировки основных проводимостей моста. Реализации, полученные таким образом, представлены на рис. 6, № 5–8. Для этих схем

$$D(p) = p^2 + p \left[\frac{C_1 + C_2}{C_1 C_2} G'_1 - \frac{G_2 G'_4}{G_3 C_2} \right] + \frac{G'_1 G'_2}{C_1 C_2}.$$

При $\frac{G_2}{G_3} = \frac{C_1 + C_2}{C_1}$ получаем условие стационарности $G_1 = G_4$.

При экспериментальной проверке выше проделанного анализа была выбрана схема № 4 рис. 6. В качестве ОУ использовался усилитель LM318N8.

Схема без дополнительных настроек обеспечила трехкратную перестройку частоты при стабильной амплитуде и коэффициенте нелинейных искажений, не превышающем 5–8%.

Представленные схемные решения генераторов (на одном ОУ с регулировкой одним резистором) не имеют аналогов и удовлетворяют важным требованиям, которые предъявляются, в частности, к автономным радиотехническим средствам.

Рассмотренные способы использования свойств инвариантности схемных функций активных цепей и получение новых технических решений расширяют возможности разработчика радиоэлектронных средств.

Литература

1. Prokopenko N.N. The Multifunctional Programmable Multiplexer of Potential Signals of Sensors / N.N. Prokopenko, N.V. Butyrugin, A.V. Bugakova, I.V. Pakhomov // International Conference on Signals and Electronic Systems (ICSES–2016). – Krakow, Poland, 2016. – P. 261–264.
2. Прокопенко Н.Н. Мультидифференциальные операционные усилители в прецизионных аналого-цифровых интерфейсах нового поколения: основные свойства, параметры и характеристики / Н.Н. Прокопенко, А.И. Серебряков, Н.В. Бутырлагин // Инновации, экология и ресурсосберегающие технологии (ИнЭРТ–2014). – Ростов н/Д.: ДГТУ, 2014. – С. 1275–1283.
3. Каталог разработок Российско-Белорусского центра аналоговой микросхемотехники / под ред. С.Г. Кручинского. – Шахты: Изд-во ЮРГУЭС, 2006. – 96 с.
4. Мезон С. Электрические цепи, сигналы и системы / С. Мезон, Г. Циммерман. – М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1963. – 619 с.
5. Широкополосные усилители [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.analog.com/ru/products/>

broadband/broadband-amplifiers.html, свободный (дата обращения: 10.01.2017).

6. А.с. СССР, № 951651, МКЛ Н03 Н11/12, Н04 В3/04. Корректор амплитудно-частотных искажений / В.А. Рыжов (СССР). – № 3210878/18-09; заявл. 03.12.80; опубл. 15.08.82. Бюл. № 30. – 2 с.

7. Управляемые гармонические генераторы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://zpostbox.ru/g3.htm>, свободный (дата обращения: 10.01.2017).

Рыжов Владимир Анатольевич

Канд. техн. наук, доцент каф.
информационной безопасности (ИБ)
Новосибирского государственного университета
экономики и управления (НГУЭУ)
Тел.: +7-951-381-59-27
Эл. почта: varann77@yandex.ru

Смулов Александр Владимирович

Инженер каф. ИБ НГУЭУ
Тел.: +7-913-018-80-56
Эл. почта: zevsthebest@mail.ru

Rizhov V.A., Smurov A.V.

Conditions of functions invariance for the synthesis of active circuits

The properties invariance of circuit functions in active circuit allows to create advanced models and technical solutions that provide a unique characteristics. This method allows to generate a large number of technical solutions that are used in modern circuit design and radio electronics.

Keywords: invariance, component, active circuits.

**УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И ИНФОРМАТИКА**

УДК 002.6

В.И. Васильев, А.М. Вульфин, Р.Т. Кудрявцева

Анализ и управление рисками информационной безопасности с использованием технологии когнитивного моделирования

Обсуждаются вопросы применения технологии когнитивного моделирования для решения задач анализа и управления информационными рисками. Даны краткие сведения, относящиеся к методологии построения нечетких когнитивных карт (НКК). На примере реализации вирусной атаки и построения системы антивирусной защиты рассмотрены основные этапы когнитивного анализа: формирование множества концептов и связей НКК, анализ устойчивости и выбор весов связей НКК, численная оценка риска (ущерба) от реализации угрозы для различных вариантов реализации контрмер по защите информации. На основании приведенных результатов вычислительных экспериментов сформулированы рекомендации по продолжению исследований.

Ключевые слова: информационная безопасность, управление информационными рисками, нечеткая когнитивная карта, устойчивость.

doi: 10.21293/1818-0442-2017-20-4-61-66

Широкое внедрение компьютерных технологий во все сферы нашей жизни, включая задачи автоматизации управления производственными и технологическими процессами на крупных и средних предприятиях различных отраслей, неизбежно сталкивается с проблемой информационной безопасности. Сегодня вопросы обеспечения информационной безопасности (ИБ) прописаны в новой редакции Доктрины информационной безопасности, принятой в декабре 2016 г. в ряде федеральных законов, многих международных и национальных стандартах (ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408, 27001–27005, 13335, 18045, СТО БР ИББС и др.), руководящих документах Федеральной службы технического и экспортного контроля (ФСТЭК) России. В основе этих документов – использование рискориентированного подхода, суть которого заключается в выявлении основных факторов, влияющих на защищенность информационной (автоматизированной) системы, и на основе проведенного анализа формировании определенного набора организационных и технических мер (контрмер), способствующих снижению риска ИБ и обеспечению заданного (допустимого) уровня защищенности системы.

Существующие методы оценки рисков традиционно делят на две большие группы, связанные с качественной и количественной оценкой уровня рисков [1, 2]. К первой группе методов относятся такие получившие широкую известность методы, как OCTAVE, CRAMM, COBRA, MSAT, КОНДОР и др., целью которых является выявление и анализ основных факторов, влияющих на уровень риска, определение их уровня относительной значимости и общая качественная оценка уровня защищенности исследуемой системы с выдачей рекомендаций по обеспечению соответствия уровня защищенности требованиям нормативных документов (стандартов).

В основе применяемых при этом методик, как правило, используются опросные карты, предоставляемые экспертам, на которые те должны отве-

тить «да», «нет», «частично» и т.п., после чего проводится соответствующая статическая обработка мнения экспертов по определенным правилам.

Вторая группа методов включает в себя такие известные методы, как и RiskWatch, АванГард, ГРИФ, позволяющие дать количественную оценку объема потерь (ущерба) от воздействия возможных угроз на каждый ценный ресурс информационной системы, выявить причины возникновения риска с подробным анализом уязвимостей, оценить экономическую эффективность принятия тех или иных контрмер. Недостатком данной группы методов является необходимость наличия на предприятии достоверной статистики по инцидентам в сфере ИБ, включая оценки объема потерь от угроз ИБ.

В последние годы для решения задач управления рисками все чаще стали применять методы когнитивного моделирования, основанные на построении нечетких когнитивных карт, выступающих в качестве неформальных качественных моделей на предварительном (концептуальном) уровне изучения исследуемой системы. Преимуществами нечетких когнитивных карт (Fuzzy Cognitive Maps, FCM), впервые предложенных в 1986 г. Б. Коско [2], являются их простота и наглядность, выявление структуры причинно-следственных связей между элементами сложной системы, трудно поддающейся количественному анализу традиционными методами, использование знаний и опыта экспертов в конкретной предметной области, адаптация к неопределенности исходных данных и условий решаемой задачи. Сегодня существует большое число разновидностей нечетких когнитивных карт (НКК) – простые (классические) НКК [2, 3], обобщенные НКК [4], реляционные НКК [5], нечеткие продукционные карты [6, 7], НКК в базе «истина–ложь–неопределенность» [8] и многие другие [9]. Основные направления исследований в данной области связаны с дальнейшей разработкой математических основ построения НКК, оценкой адекватности, структурной сложности и устойчивости НКК, выбором алгоритмов их обучения, обеспечивающих желаемые

характеристики НКК для достижения поставленных целей [10–17]. Вопросы применения НКК для решения задач анализа и управления рисками обсуждаются в [18–21].

Предлагаемая ниже статья ставит своей целью показать на примере те возможности и ограничения, которые предоставляет технология когнитивного моделирования в классе простых НКК для получения качественной оценки рисков ИБ и выбора рационального способа управления риском, обеспечивающего снижение влияния угрозы и уязвимости на информационный ресурс.

Нечеткие когнитивные карты

Под *нечеткой когнитивной картой* понимается модель исследуемой системы (объекта, проблемы) в форме ориентированного графа (орграфа), заданного с помощью набора множеств

$$\text{НКК} = \langle \mathbf{C}, \mathbf{F}, \mathbf{W} \rangle, \quad (1)$$

где $\mathbf{C} = \{C_i\}$ – множество вершин графа, называемых *концептами*, в качестве которых выступают факторы (понятия), наиболее существенные с точки зрения изучения рассматриваемой системы; $\mathbf{F} = \{F_k\}$ – множество направленных дуг графа – связей между концептами; $\mathbf{W} = \{W_{ij}\}$ – множество весов дуг (связей).

Предполагается, что связи между концептами могут быть положительными, «усиливающими» влияние концепта C_i на концепт C_j ($W_{ij} > 0$), или отрицательными, «ослабляющими» влияние концепта C_i на концепт C_j ($W_{ij} < 0$). В простейшем случае $W_{ij} = +1$ или $W_{ij} = -1$, при этом говорят о *знаковом* орграфе. Значения весов (силы связей) W_{ij} могут задаваться с помощью нечеткой лингвистической шкалы, представляющей собой упорядоченное множество лингвистических значений (термов) оценок силы связи, например, вида

СИЛА_СВЯЗИ = {Не_влияет; Слабая; Средняя; Сильная; Очень_сильная}.

Каждому из этих значений ставится в соответствие некоторый числовой диапазон, принадлежащий отрезку $[0, 1]$ для положительных связей (пример – табл. 1), или отрезку $[-1, 0]$ для отрицательных связей.

Таблица 1

Оценка силы связи между концептами	
Лингвистическое значение	Числовой диапазон
Не влияет	0
Очень слабая	(0; 0,15]
Слабая	(0,15; 0,35]
Средняя	(0,35; 0,6]
Сильная	(0,6; 0,85]
Очень сильная	(0,85; 1]

Предполагается, что, отвечая на вопрос о силе связи между концептом C_i и концептом C_j , эксперт выбирает одно из приведенных здесь лингвистических значений и некоторую «точечную» оценку силы связи – число внутри этого диапазона (если экспертов несколько, то в качестве веса W_{ij} принимается среднее из данных ими оценок). Более

подробные рекомендации относительно выбора весов НКК можно найти в [22].

Знаковый орграф полностью задается своей *матрицей смежности*

$$\mathbf{W} = \begin{pmatrix} W_{11} & W_{12} & \dots & W_{1n} \\ W_{21} & W_{22} & \dots & W_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ W_{n1} & W_{n2} & \dots & W_{nn} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

элементы которой W_{ij} принимают значения +1 (положительная связь), –1 (отрицательная связь) или 0 (отсутствие связи); n – число концептов НКК.

В общем случае для взвешенного орграфа с произвольными значениями весов $W_{ij} \in [-1, 1]$ можно говорить о динамике изменения его состояния во времени. Состояние орграфа (НКК) при этом определяется совокупностью состояний его концептов C_i , ($i = 1, 2, \dots, n$), каждое из которых описывается переменной состояния $X_i(t)$, принимающей значения из интервала $[0, 1]$. Последнее достигается путем нормирования первоначальных («физических») переменных состояния \bar{X}_i по формуле

$$X_i = \frac{\bar{X}_i - X_{i\min}}{X_{i\max} - X_{i\min}}, \quad (3)$$

где $\bar{X}_{i\min}$ и $\bar{X}_{i\max}$ – минимальное и максимальное значения переменной \bar{X}_i , ($i = 1, 2, \dots, n$).

Знаковый орграф считается линейным, его уравнения состояния записываются как

$$X(t+1) = \mathbf{W} \cdot X(t), \quad (4)$$

где $\mathbf{X} = (X_1, X_2, \dots, X_n)^T$ – вектор состояния орграфа; \mathbf{W} – матрица смежности; $t = 0, 1, 2, \dots$ – дискретное время.

Для взвешенного орграфа с произвольно заданными значениями весов W_{ij} уравнения состояния обычно записываются в следующем виде:

$$X_i(t+1) = f \left(\sum_{j=1}^n W_{ji} X_j(t) \right), \quad (i = 1, 2, \dots, n), \quad (5)$$

где f – некоторая нелинейная «сжимающая» функция, отображающая значения аргумента в единичный интервал $[0, 1]$.

Этому условию удовлетворяет, например, сигмоидная функция

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}. \quad (6)$$

Важным этапом анализа НКК является анализ устойчивости ее равновесных состояний для знакового орграфа, который сводится к вычислению собственных чисел матрицы смежности, т.е. корней характеристического уравнения

$$|\mathbf{W} - \lambda \cdot \mathbf{I}| = 0, \quad (7)$$

где \mathbf{I} – единичная матрица размера $n \times n$; λ – комплексная переменная.

Согласно [10] необходимо различать *импульсную устойчивость* орграфа, когда для заданного ненулевого начального состояния $X_i(0)$ одной из его вершин, например $X_1(0) = 1, X_2(0) = \dots = X_n(0) = 0$, последовательность значений импульсов $p_i(t) = X_i(t) - X_i(t-1)$ ограничена в любой момент времени $t = 1, 2, \dots$ для

любой его вершины, и абсолютную устойчивость, когда для каждой вершины орграфа ($i = 1, 2, \dots, n$) ограничена последовательность значений $X_i(t), t = 1, 2, \dots$. При этом справедливо следующее:

Утверждение 1. [10]. Знаковый орграф импульсно (абсолютно) устойчив, если все ненулевые собственные числа матрицы \mathbf{W} равны по абсолютной величине единице.

При определении устойчивости взвешенного орграфа можно воспользоваться другим утверждением, основанным на оценке абсолютных значений весов НКК [15].

Утверждение 2. Взвешенный орграф, описываемый уравнениями (5), (6), абсолютно устойчив, причем существует единственное равновесное (установившееся) решение этих уравнений («неподвижная точка») X^* в том и только в том случае, если

$$\left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}^2 \right)^{\frac{1}{2}} < 4, \quad (8)$$

где n – число концептов НКК.

Общая постановка процедуры анализа НКК включает в себя два этапа.

Задача анализа: для заданных начальных условий ($X_1(0), X_2(0), \dots, X_n(0)$), используя уравнения (4) или (5), (6), рассчитать переходные процессы $X_i(t), (t = 0, 1, 2, \dots)$, вызванные этими начальными условиями или некоторым внешним воздействием; определить установившиеся (равновесные) значения переменных состояния X_i^* .

Задача синтеза: найти такие скорректированные значения весов связей W_{ij} , а возможно и добавить новые концепты или связи, при которых обеспечивались бы желаемые установившиеся значения X_i^* целевых концептов $C_e (l = 1, 2, \dots, n; n_1 < n)$ – выходов НКК.

Анализ и управление информационными рисками

Рассмотрим следующий пример. Допустим, что необходимо проанализировать последствия от реализации вирусной атаки на некоторый информационный ресурс, расположенный на рабочей станции (АРМ оператора). Тогда в соответствии с известной 3-факторной формулой оценки риска: РИСК = УГРОЗА × УЯЗВИМОСТЬ × УЩЕРБ [1] можно воспользоваться схемой НКК, приведенной на рис. 1.

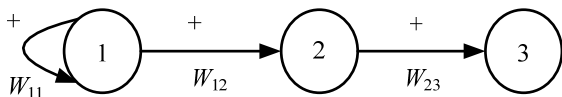


Рис. 1. Нечеткая когнитивная карта для оценки риска

Здесь 1 – концепт C_1 , представляющий собой угрозу (вирусную атаку); 2 – концепт C_2 , характеризующий уязвимость (например, отсутствие обновлений антивирусного ПО); 3 – концепт C_3 , характеризующий ущерб от нарушения целостности

информации вследствие реализации угрозы C_1 через уязвимость C_2 .

Переменные состояния: X_1 – вероятность возникновения угрозы; X_2 – вероятность успешной реализации уязвимости; X_3 – величина ущерба от воздействия угрозы (в относительных единицах).

Рассмотрим 2 варианта представления НКК; а) в виде знакового орграфа; б) в виде взвешенного графа.

В первом случае будем полагать, что все веса НКК на рис. 1 принимают одинаковые значения, равные +1: $W_{11} = W_{12} = W_{23} = 1$ (положительные связи). Наличие цикла положительной обратной связи для концепта C_1 указывает на то, что данный концепт выступает в качестве независимого входа (источника), характеризующего воздействие на соседние концепты со стороны внешней среды (в [13] подобные концепты названы драйверами). Матрица смежности в данном случае принимает вид

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

С целью анализа устойчивости НКК составим характеристическое уравнение

$$|\mathbf{A} - \lambda \cdot \mathbf{I}| = \begin{vmatrix} 1-\lambda & 1 & 0 \\ 0 & -\lambda & 1 \\ 0 & 0 & -\lambda \end{vmatrix} = \lambda^2(1-\lambda) = 0,$$

корни которого (т.е. собственные числа матрицы \mathbf{W}) в данном случае принимают значения $\lambda_{1,2} = 0; \lambda_3 = 1$. Следовательно, в соответствии с приведенным выше Утверждением 1 данный орграф является импульсно (абсолютно) устойчивым.

Переходя к взвешенному орграфу (см. рис. 1), предположим, что эксперт назначил следующие значения весов связей НКК: $W_{11} = 1, W_{12} = W_{23} = 0,8$ (т.е. связи между концептами C_1, C_2 и C_3 – «сильные»). Введение цикла положительной обратной связи для концепта C_1 ($W_{11} = 1$) позволяет принудительно «удерживать» его начальное состояние $X_1(0) = 1$ в последующие моменты времени, принимая в дальнейшем $X(t) = 1$ для всех $t = 1, 2, \dots$. Воспользовавшись уравнениями состояния (5), (6) для начальных условий $X(0) = (1, 0, 0)$, находим установившееся (равновесное) значение переменной X_3 , т.е. риска; $X_3^* = R = 0,63$. Таким образом, максимальное значение ущерба от реализации угрозы (вирусной атаки) при отсутствии специальных мер защиты составляет 0,63, т.е. 63% от максимальной границы возможного ущерба $R_{\max} = 1$.

Потребуем, чтобы за счет принятия дополнительных контрмер риск снизился до некоторого минимального (допустимого) уровня. При этом можно воспользоваться следующими рекомендуемыми способами управления риском [1]:

- уменьшение вероятности воздействия угрозы на информационные ресурсы;
- уменьшение вероятности использования уязвимости;
- уменьшение возможного ущерба путем обнаружения нежелательных событий, реагирования и восстановления ресурса.

Рассмотрим два варианта управления риском, реализующих указанные способы (рис. 2).

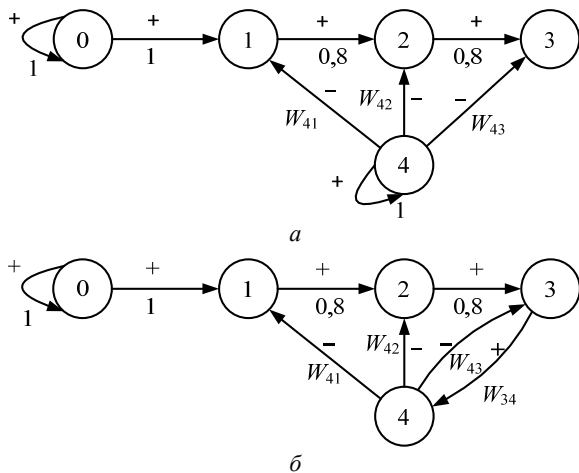


Рис. 2. Схемы НКК для управления риском:
а – «жесткое» (централизованное) управление;
б – «мягкое» (адаптивное) управление

На рис. 2: C_1 – угроза (вирусная атака); C_2 – уязвимость (отсутствие обновления антивирусного ПО); C_3 – ущерб от реализации угрозы; C_4 – контрмеры по защите информации. Дополнительно введенные отрицательные связи с весами W_{41} , W_{42} , W_{43} характеризуют соответственно влияние контрмер на основные факторы, определяющие уровень риска:

- $C_4 \rightarrow C_1$: распознавание и блокирование вируса на ранней стадии;
- $C_4 \rightarrow C_2$: обновление антивирусного ПО;
- $C_4 \rightarrow C_3$: частичное или полное восстановление искаженной информации.

Дополнительно введенный концепт C_0 выполняет функцию драйвера, обеспечивая значение вероятности «исходной» угрозы $X_0(t) = 1$ для всех $t = 0, 1, 2, \dots$. Переменная X_1 характеризует вероятность «модифицированной» угрозы с учетом влияния концепта C_4 . Переменная X_4 в обоих случаях (рис. 2, а, б) определяет ресурсы, выделенные на реализацию мер защиты информации. Дополнительная связь $C_3 \rightarrow C_4$ с весом W_{34} характеризует учет результатов контроля (мониторинга) за состоянием защищаемой информации C_4 . Различие между двумя указанными выше вариантами состоит в том, что в 1-м случае (рис. 2, а) ресурсы концепта-драйвера C_4 жестко выделяются в фик-

сированном объеме и затем перераспределяются по выполняемым функциям защиты, а во 2-м случае (рис. 2, б) величина этих ресурсов зависит от фактического состояния защищенности информации (ущерба) C_3 и может варьироваться в определенных пределах.

НКК на рис. 2, а имеет 2 контура положительной обратной связи ($C_0 \rightarrow C_0$, $C_4 \rightarrow C_4$) для драйверов C_0 и C_4 , а НКК на рис. 2, б: 1 контур положительной обратной связи ($C_0 \rightarrow C_0$) и 3 контура отрицательной обратной связи ($C_4 \rightarrow C_3 \rightarrow C_4$; $C_4 \rightarrow C_2 \rightarrow C_3 \rightarrow C_4$; $C_4 \rightarrow C_1 \rightarrow C_2 \rightarrow C_3 \rightarrow C_4$). Матрицы смежности для обоих вариантов запишутся соответственно как

$$W_a = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -1 & -1 & 1 \end{pmatrix}; \quad W_b = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & -1 & -1 & 0 \end{pmatrix},$$

откуда получаем характеристические уравнения: $|W_a - \lambda \cdot I| = \lambda^2(1 - \lambda)^3 = 0$; $|W_b - \lambda \cdot I| = \lambda^2(1 - \lambda)(\lambda^2 - \lambda + 1)$. Учитывая, что корни этих уравнений принимают значения $\lambda_{1,2} = 0$; $\lambda_{3,4,5} = 1$ (для варианта а) и $\lambda_{1,2} = 0$;

$\lambda_3 = 1$; $\lambda_{4,5} = \frac{1 \pm j\sqrt{3}}{2}$ (для варианта б), можно сделать вывод о том, что оба этих варианта НКК импульсно (абсолютно) устойчивы.

Допустим далее, что изначально заданные значения весов связей $W_{12} = W_{23} = 0,8$ сохраняются, а значения весов W_{41} , W_{42} , W_{43} , W_{34} назначаются экспертом (соответствующие варианты задания весов для каждой из двух схем, приведенных на рис. 2, а, б, представлены в табл. 2). Легко проверить, что условие устойчивости (8) во всех случаях выполняется (веса связей-драйверов $W_{00} = W_{01} = 1$ и $W_{44} = 1$ в данном случае не учитываются [14]). Таким образом, оператор в правой части уравнений (5) является оператором сжатия и, следовательно, для заданных начальных условий $X(0) = (1, 0, 0, 0, 1)^T$ – для схемы на рис. 2, а и $X(0) = (1, 0, 0, 0, 0)^T$ – для схемы на рис. 2, б достигается установившееся (равновесное) состояние $X^* = (X_0^*, X_1^*, X_2^*, X_3^*, X_4^*)^T$. Результаты моделирования, полученные с помощью разработанного авторами автоматизированного пакета FCMBuilder [23], приведены в табл. 2.

Анализ результатов, приведенных в табл. 2, позволяет сделать определенные выводы:

1. Использование НКК дает некоторую сравнительную базу для выбора вариантов построения системы защиты информации, исходя из приемлемого уровня обеспечения рисков ИБ. Так, вариант а-4

Таблица 2

Результаты моделирования								
№ варианта	W_{41}	W_{42}	W_{43}	W_{34}	X_1^*	X_2^*	$X_3^* = R$	X_4^*
а-1	-0,8	-0,5	-0,5	0	0,55	0,49	0,47	1
а-2	-0,5	-0,8	-0,5	0	0,62	0,43	0,46	1
а-3	-0,8	-0,8	-0,5	0	0,55	0,41	0,46	1
а-4	-0,8	-0,8	-0,8	0	0,55	0,41	0,38	1
б-1	-0,8	-0,5	-0,5	0,5	0,63	0,56	0,55	0,57
б-2	-0,5	-0,8	-0,5	0,5	0,67	0,52	0,53	0,57
б-3	-0,8	-0,8	-0,5	0,5	0,63	0,51	0,53	0,57
б-4	-0,8	-0,8	-0,8	0,5	0,63	0,51	0,48	0,59

оказывается предпочтительнее вариантов а-1 – а-3, поскольку он предлагает уделить одинаково серьезное внимание всем 3 компонентам риска (парирование угрозы – ликвидация уязвимости – устранение последствий от реализации угрозы), что соответствует так называемому «принципу равнопрочности» защиты.

2. Возможное разбиение полученных решений по уровням риска (например, $0,55 < R \leq 0,65$ – высокий уровень; $0,45 < R \leq 0,55$ – средний уровень; $0,35 < R \leq 0,45$ – низкий уровень риска) является в значительной степени условным; столь малый разрыв между верхней и нижней границей риска объясняется, прежде всего, сжимающим характером сигмоидной функции (6), причем эффект сжатия проявляется тем сильнее, чем больше концептов располагается на пути от источника до целевого фактора.

3. Приоритет в пользу выбора решений, соответствующих схеме НКК на рис. 2, а, по сравнению со схемой НКК на рис. 2, б обусловлен главным образом большим объемом ресурсов, выделенных на реализацию контрмер в 1-м случае (переменная $X_4^* = 1$), в то время как во 2-м случае максимальное значение объема ресурсов достигает лишь величины $X_4^* = 0,59$ для варианта б-4.

4. Несмотря на то, что сигмоидная функция (6) представляет собой оператор сжатия, что гарантирует (в силу утверждения 2) существование и устойчивость равновесного состояния НКК, условие (8) является достаточно жестким требованием по отношению к значениям весов НКК, что может послужить серьезным ограничением при построении НКК большой размерности, содержащих большое число концептов и связей.

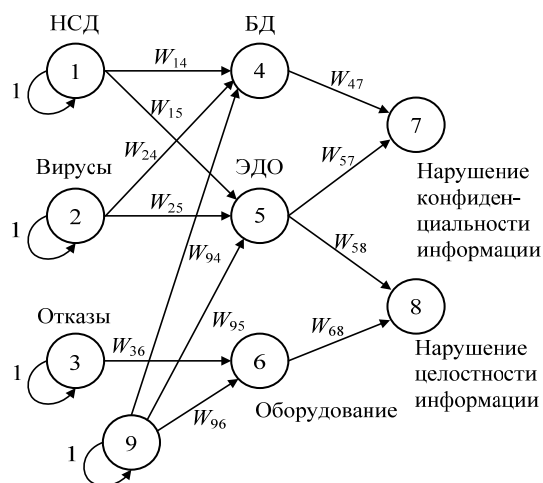


Рис. 3. НКК, характеризующая влияние совокупности угроз на возникновение рисков, связанных с нарушением конфиденциальности и целостности информации

Следует отметить, что рассмотренной выше пример (схемы НКК на рис. 1, 2) имеет главным образом методический характер. Реальные ситуации, возникающие на практике, требуют построения и исследования более сложных по своему составу

НКК, включающих достаточно большое число концептов и связей. На рис. 3 приведён пример такой НКК, характеризующей влияние некоторой совокупности угроз на возникновение рисков, связанных с нарушением конфиденциальности и целостности информации.

Здесь C_1 , C_2 и C_3 – угрозы, связанные соответственно с попытками несанкционированного доступа (НСД) к информации, вирусной атакой и отказами оборудования; C_4 , C_5 и C_6 – уязвимости, вызванные отсутствием надлежащей защиты базы данных (БД), электронного документооборота (ЭДО) и оборудования; C_7 и C_8 – ущерб (потери) от нарушения конфиденциальности и целостности информации; C_1 – контрмеры по защите информации. Пользуясь изложенной выше методикой, можно не только оценить возможные риски от воздействия угроз, но и выбрать правильную (рациональную) стратегию защиты информации.

Заключение

Целью данной статьи было показать те возможности и преимущества, которые предоставляет технология когнитивного моделирования (в частности, аппарат нечетких когнитивных карт) для решения задачи анализа и управления информационными рисками. Особенностью применения данной технологии является акцент на выявление наиболее существенных факторов, оказывающих влияние на постановку задачи, и получение необходимого результата, оценка существующих между ними причинно-следственных связей, возможность сравнительного анализа различных вариантов принятия решений. Полученные при этом качественные модели в виде НКК особенно полезны на этапе предварительной оценки рисков информационной безопасности, при отсутствии достоверной статистики об имеющихся и потенциальных возможных инцидентах ИБ.

В качестве перспективного направления исследований, связанных с решением задач анализа и управления информационными рисками, следует ожидать применение реляционных НКК и нечетких продукционных карт, обладающих в силу большей общности рядом дополнительных преимуществ по сравнению с рассмотренным выше классом нечетких когнитивных карт Б. Коско.

Литература

1. Астахов А.М. Искусство управления информационными рисками. – М.: ДМК-Пресс, 2010. – 312 с.
2. Kosko B. Fussy Cognitive Maps // International Journal of Man-Machine Studies. – 1986. – Vol. 1. – P. 65–75.
3. Stylios C.D. Introducing the theory of fuzzy cognitive maps in distributed systems / C.D. Stylios, V.C. Georgopoulos, P.P. Groumpos // Proceedings of the Twelfth IEEE Intern. Symposium on Intelligent Control, 16–18 July 1997, Istanbul, Turkey. – Istanbul: IEEE, 1997. – P. 55–60.
4. Hagiwara M. Extended Fuzzy Cognitive Maps // Proceedings of the IEEE Conf. on Fuzzy Systems, 8–12 March 1992, San-Diego, USA. – San-Diego: IEEE, 1992. – P. 161–172.
5. Федулов А.С. Нечеткие реляционные когнитивные карты // Изв. Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2005. – № 1. – С. 120–132.

6. Силов В.Б. Принятие стратегических решений в нечеткой обстановке. – М.: ИНПРО-РЕС, 1995. – 228 с.

7. Борисов В.В. Анализ динамики состояния сложных систем на основе обобщенных нечетких продукционных когнитивных карт / В.В. Борисов, А.С. Федулов, Е.С. Устиненко // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. – М.: Радиотехника, 2007. – № 1. – С. 17–23.

8. Kandasamy W.B.V. Fuzzy Cognitive Maps and Neutrosophic Cognitive Maps / W.B.V. Kandasamy, F. Smarandache. – 2003 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://arxiv.org/ftp/math/papers/0311/03111063.pdf>, свободный (дата обращения: 01.09.2017).

9. Papageorgiou E.I. Review of Fuzzy Cognitive Maps Research During the Last Decade / E.I. Papageorgiou, I.A. Salmeron // IEEE Trans. on Fuzzy Systems. – 2013. – Vol. 21, № 1. – P. 66–79.

10. Робертс Ф.С. Дискретные математические модели с приложениями к социальным, биологическим и экологическим задачам / под ред. А.И. Теймана. – М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. – 496 с.

11. Glykas M. (ed.). Fuzzy Cognitive Maps: Advances in theory, methodologies, tools and applications. // Springer Science & Business Media. – 2010. – Т. 247 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.springer.com/us/book/9783642032196>, свободный (дата обращения: 01.09.2017).

12. Papageorgiou E. (ed.). Fuzzy Cognitive Maps for Applied Sciences and Engineering: From Foundations to Extensions and Learning Algorithms // Springer Science & Business Media. – 2014. – Т. 54 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.springer.com/us/book/9783642397387>, свободный (дата обращения: 01.09.2017).

13. Knight CR.J.K. Linear and Sigmoidal Fuzzy Cognitive Maps: An Analysis of Fixed Points / CR.J.K. Knight, D.J.B. Lloyd, A.S. Penn [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://pdfs.semanticscholar.org/>, свободный (дата обращения: 01.09.2017).

14. Carvalho J.P. Issues in the Stability of Fuzzy Cognitive Maps and Rule – Based Fuzzy Cognitive Maps / J.P. Carvalho, Y.A.V. Tome [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: www.inesc-id.pt/indicadores/Ficherois/119.pdf, свободный (дата обращения: 01.09.2017).

15. Boutalis Y. On the existence and uniqueness of solutions for the concept values in fuzzy cognitive maps / Y. Boutalis, Th.L. Kottas, M. Christodoulou // Decision and Control, 2008. CDC 2008. 47th IEEE Conference on. – Cancun: IEEE, 2008. – P. 98–104.

16. Marchenko A.S. Investigating Stability Analysis Issues for Fuzzy Cognitive Maps / A.S. Marchenko, I.L. Ermolov, P.P. Groumpos et al. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: kcc.teiep.gr/stylios/pdf/, свободный (дата обращения: 01.09.2017).

17. Boutalis Y. Adaptive estimation of fuzzy cognitive maps with proven stability and parameter convergence / Y. Boutalis, Th.L. Kottas, M. Christodoulou // Journal IEEE Trans. On Fuzzy Systems. – 2009. – Vol. 17, Iss. 4. – P. 874–889.

18. Гузаиров М.Б. Системный анализ информационных рисков с применением нечетких когнитивных карт / М.Б. Гузаиров, В.И. Васильев, Р.Т. Кудрявцева // Информационные технологии. – 2007. – Т. 5, № 4. – С. 42–48.

19. Степанова У.С. Разработка модели угроз на основе построения нечеткой когнитивной карты для численной оценки риска нарушения информационной безопасности / У.С. Степанова, И.В. Машкина, В.И. Васильев

// Изв. ЮФУ. Технические науки. – Тематич. вып. «Информационная безопасность». – Таганрог: ТТИ ЮФУ. – 2010. – № 11 (112). – С. 31–40.

20. Ажмухамедов И.М. Динамическая нечеткая когнитивная модель оценки уровня информационной безопасности информационных активов вуза // Вестник АГТУ. Сер.: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2012. – № 2. – С. 137–141.

21. Yebjah-Bouteng E.O. Using fuzzy cognitive maps (FCMs) To evaluate the vulnerabilities with ICT assets disposal policies // Intern. Journal on Electrical & Computer Sciences IJECIS-IJENS. – 2012. – Vol. 12, № 05. – P. 20–31.

22. Кулинич А.А. Компьютерные системы моделирования когнитивных карт. Подходы и методы // Проблемы управления. – М., 2010. – № 3. – С. 2–16.

23. Васильев В.И. Автоматизация процесса оценки информационных рисков с использованием нечетких когнитивных карт / В.И. Васильев, Р.Т., Кудрявцева, В.А. Юдинцев // Вестник УГАТУ, 2014. – Т. 18, № 3 (64). – С. 253–260.

Васильев Владимир Иванович

Д-р техн. наук, профессор каф. вычислительной техники и защиты информации (ВТиЗИ) Уфимского государственного авиационного технического ун-та (УГАТУ)
Тел.: +7-917-350-11-39
Эл. почта: vasilyev@ugatu.ac.ru

Вульфин Алексей Михайлович

Канд. техн. наук, доцент каф. ВТиЗИ УГАТУ
Тел.: +7-917-40-02-189
Эл. почта: vulfin.alexey@gmail.com

Кудрявцева Рима Тимиршаиховна

Канд. техн. наук, доцент каф. ВТиЗИ УГАТУ
Тел.: +7-917-454-67-66
Эл. почта: cudrt@mail.ru

Vasilyev V.J., Vulfin A.M., Kudryavtseva R.T.

Analysis and management of information security risks using cognitive modeling technology

The issues of applying the cognitive modeling technology to solve the problems of information risks analysis and management are discussed. The brief information related to the methodology of fuzzy cognitive maps (FCM) construction is presented. On the example of a virus attack and building an anti-virus system, the main stages of cognitive analysis are considered: generating a set of FCM concepts and links, analysis of FCM stability and selection of FCM links weights, numerical evaluation of risk (damage) from the threat action for different variants of countermeasures implementation for information protection. Based on the obtained computer experiments results the recommendations for the further research are formulated.

Keywords: information security, information risks management, fuzzy cognitive map, stability.

УДК 004.942, 51-74, 519.857.3

И.В. Бордак, А.П. Росенко

Разработка метода количественной оценки и прогнозирования безопасности информации ограниченного доступа на основе Марковских случайных процессов

Разработаны метод и программная реализация для определения вероятностей последствий от реализации злоумышленником угроз безопасности информации ограниченного доступа (ИОД) на основе Марковских случайных процессов (МСП) при воздействии на автоматизированную информационную систему (АИС) зависимых угроз. Предложенный метод и программное обеспечение на основе МСП показали возможность реализовать количественную оценку безопасности ИОД, что позволит, используя полученные данные, разрабатывать научно обоснованные организационно-профилактические мероприятия по повышению уровня защищенности ИОД. Разработанные и обоснованные практические рекомендации при реализации собственниками ИОД обеспечат повышение защищенности информации, минимизацию материального ущерба за счет выбора оптимальных стратегий, применяемых методов и средств защиты ИОД.

Ключевые слова: безопасность информации, угрозы, математическая модель, математическое моделирование, Марковские случайные процессы.

doi: 10.21293/1818-0442-2017-20-4-67-70

Обеспечение безопасности ИОД всегда было и остается одной из важнейших проблем защиты информации (ЗИ). В результате утечки ИОД наносится значительный материальный и моральный ущерб не только собственнику такой информации, но и государству в целом [1]. Сложность проблемы обеспечения безопасности ИОД состоит в том, что ее решение зависит от многочисленных факторов, реализуемых на всех стадиях проектирования, создания и эксплуатации (АИС). В настоящее время вследствие ряда объективных причин, в первую очередь экономических, сложилась ситуация, когда теоретические разработки и применяемые методы и средства ЗИ ориентированы в основном на получение качественных характеристик. Проблема усугубляется априорной недостаточностью исходной информации, что сдерживает применение количественных методов оценки безопасности ИОД. А это, в свою очередь, порождает отставание теории безопасности ИОД от уровня развития теории ЗИ.

Большой вклад в формирование новых взглядов на актуальность проблемы, необходимость разработки и внедрения современных научно обоснованных средств, методов и технологий ЗИ внесли отечественные [1, 2] и зарубежные авторы [3, 4].

Однако, как показывает анализ, это в большей мере относится к исследованиям воздействия на АИС компьютерных вирусов, ограничению и разграничению доступа к компьютерной информации и т.п. В то же время отсутствие методов математического и компьютерного моделирования процессов и явлений, протекающих в АИС, существенно усложняет процедуру установления причинно-следственных связей при воздействии на нее дестабилизирующих факторов различной природы. Это, в свою очередь, порождает непонимание существующей проблемы как со стороны исследователей, так и собственников ИОД.

В данной работе показано, что АИС относится к сложным стохастическим человеко-машинным системам, в которой количественную оценку безопасности ИОД возможно осуществлять на основе применения к АИС Марковских случайных процессов.

Разработка метода количественной оценки и прогнозирования безопасности информации ограниченного доступа для зависимых потоков угроз

Воздействующие на АИС угрозы безопасности ИОД могут взаимно порождаться с некоторыми вероятностями r_{1i}, \dots, r_{in} . Поэтому предлагается принять базовую модель Марковского случайного процесса с дискретным параметром для оценки безопасности ИОД, с учетом воздействия на АИС зависимых потоков угроз. Граф состояний для модели такого типа изображен на рис. 1 [5]:

В соответствии с рис. 1 приняты следующие обозначения: $q_{01}, \dots, q_{0i}, \dots, q_{0n}$ – вероятности возникновения i -й угрозы, характеризуют возможности злоумышленника по несанкционированному доступу к ИОД; $R_{10}, \dots, R_{i0}, \dots, R_{n0}$ – вероятности парирования возникшей i -й угрозы, характеризующие возможности собственника ИОД по её защите; $\bar{R}_{1,n+1}, \dots, \bar{R}_{i,n+1}, \dots, \bar{R}_{n,n+1}$ – вероятности непарирования возникшей i -й угрозы силами и средствами, принимаемыми собственником ИОД, соответствуют поглощающему состоянию, характеризуют реализацию злоумышленником угрозы безопасности ИОД. $0, 1, \dots, i, \dots, n, n+1$ – состояния, в которых может оказаться рассматриваемая система в результате воздействия n зависимых угроз [6].

В соответствии с рис. 1 матрица вероятностей переходов системы в различные состояния примет вид

$$\|P_{ij}\| = \begin{pmatrix} 1 - \sum q_{0i} & q_{01} & \dots & q_{0i} & \dots & q_{0n} & 0 \\ R_{10} & 0 & \dots & r_{1i} & \dots & r_{1n} & \bar{R}_{1,n+1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_{i0} & r_{i1} & \dots & 0 & \dots & r_{in} & \bar{R}_{i,n+1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_{n0} & r_{n1} & \dots & r_{ni} & \dots & 0 & \bar{R}_{n,n+1} \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

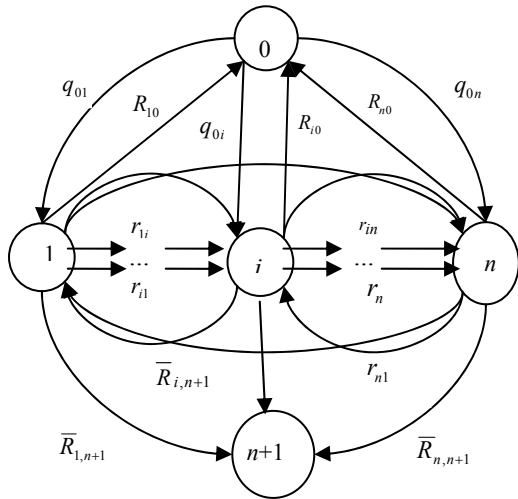


Рис. 1. Граф состояний при воздействии на АИС n зависимых потоков угроз

Матрица (1) позволяет определить вероятности переходов АИС в различные состояния.

После первого шага вероятности состояний будут равны

$$P_0(1) = 1 - \sum q_i; \quad P_1(1) = q_{01}; \quad \dots; \quad P_i(1) = q_{0i}; \quad \dots; \quad P_n(1) = q_{0n}; \quad P_{n+1}(1) = 0. \quad (2)$$

После k -го шага вероятности состояний примут следующий вид:

$$\begin{aligned} P_0(k) &= \sum_{j=0}^{n+1} P_j(k-1)P_{j0} = P_0(k-1)P_{00} + P_1(k-1)P_{10} + \dots + P_j(k-1)P_{j0} + P_n(k-1)P_{n0} + P_{n+1}(k-1)P_{n+1,0}; \\ P_1(k) &= \sum_{j=0}^{n+1} P_j(k-1)P_{j1} = P_0(k-1)P_{01} + P_1(k-1)P_{11} + \dots + P_j(k-1)P_{j1} + P_n(k-1)P_{n1} + P_{n+1}(k-1)P_{n+1,1}; \\ &\dots \dots \dots; \\ P_i(k) &= \sum_{j=0}^{n+1} P_j(k-1)P_{ji} = P_0(k-1)P_{0i} + P_1(k-1)P_{1i} + \dots + P_j(k-1)P_{ji} + P_n(k-1)P_{ni} + P_{n+1}(k-1)P_{n+1,i}; \\ &\dots \dots \dots; \\ P_n(k) &= \sum_{j=0}^{n+1} P_j(k-1)P_{jn} = P_0(k-1)P_{0n} + P_1(k-1)P_{1n} + \dots + P_j(k-1)P_{jn} + P_n(k-1)P_{nn} + P_{n+1}(k-1)P_{n+1,n}; \end{aligned} \quad (3)$$

$$P_{n+1}(k) = \sum_{j=0}^{n+1} P_j(k-1)P_{j,n+1} = P_0(k-1)P_{0,n+1} + P_1(k-1)P_{1,n+1} + \dots + P_j(k-1)P_{j,n+1} + P_n(k-1)P_{n,n+1} + P_{n+1}(k-1)P_{n+1,n+1}.$$

Тогда после k -го шага вероятность благополучного исхода от воздействия на АИС зависимых потоков угроз определится следующим образом:

$$P_{БИ}(k) = P_0(k) + P_1(k) + \dots + P_i(k) + P_n(k). \quad (4)$$

Вероятность неблагоприятного исхода как противоположного события будет равна

$$Q_{БИ}(k) = P_{n+1}(k). \quad (5)$$

Так как $P_{БИ}(k)$ и $Q_{БИ}(k)$ составляют полную группу событий, тогда

$$P_{БИ}(k) + Q_{БИ}(k) = 1. \quad (6)$$

Выражение (6) используется как проверочное условие.

Разработка программного обеспечения

В соответствии с представленной моделью количественной оценки безопасности ИОД для зависимых потоков угроз разработаны алгоритм и программное обеспечение [5, 8]. Для реализации алгоритма выбрана система программирования Delphi, так как предоставляет наиболее широкие возможности для программирования приложений ОС Windows.

При разработке программного обеспечения в качестве входных параметров использовались:

- количество рассматриваемых угроз (N), характеризующее угрозы в актуальном на данный момент списке угроз;
- количество шагов алгоритма (K). Так как выбранный метод количественной оценки безопасности ИОД дискретен, то и сам алгоритм рассматривается по шагам (1, 2, ... K);
- матрица переходных вероятностей (1), характеризующая исходный граф состояний АИС, а именно: $q_{01}, \dots, q_{0i}, \dots, q_{0n}$ - вероятность возникновения i -й угрозы; $R_{10}, \dots, R_{i0}, \dots, R_{n0}$ - вероятность парирования возникшей i -й угрозы; $\bar{R}_{1,n+1}, \dots, \bar{R}_{i,n+1}, \dots, \bar{R}_{n,n+1}$ - вероятность непарирования возникшей i -й угрозы; r_{ij} - вероятность того, что при реализации i -й угрозы порождается j -я угроза безопасности ИОД.

Выходные параметры программы количественной оценки безопасности ИОД следующие:

- матрица, вероятности которой характеризуют возможность системы находиться в любом из 0, 1, ..., i , ..., n , $n+1$ состояний на каждом из K шагов алгоритма;
- вероятности благополучного ($P_{БИi}$) и неблагоприятного ($Q_{БИi}$) исходов от реализации угроз, рассчитанные для каждого из K шагов алгоритма;
- графическое представление зависимости $P_{БИi}$ от реализованных злоумышленником угроз

безопасности ИОД и K – количества шагов алгоритма.

Исследование влияния зависимых угроз на вероятность благополучного исхода

При моделировании процесса количественной оценки безопасности ИОД для исследования влияния параметров, определяющих возможности злоумышленника по несанкционированному доступу к защищаемой информации и возможности собственника по защите ИОД на величину вероятности благополучного исхода, были рассмотрены входные параметры с разными показателями вероятностей возникновения угроз и вероятностей парирования угроз [7].

Исходные данные для моделирования представлены для четырех режимов моделирования:

– первый режим соответствует следующим исходным данным:

$$q_{01} = 0,05, \quad q_{02} = 0,1, \quad q_{03} = 0,15,$$

$$R_{10} = 0,75, \quad R_{20} = 0,8, \quad R_{30} = 0,85,$$

которые характеризуют то, что защитные возможности собственника ИОД значительно эффективнее, чем возможности злоумышленника по несанкционированному доступу к защищаемой информации;

– второй режим моделирования осуществлялся при следующих исходных данных:

$$q_{01} = 0,2, \quad q_{02} = 0,25, \quad q_{03} = 0,3,$$

$$R_{10} = 0,75, \quad R_{20} = 0,8, \quad R_{30} = 0,85,$$

которые свидетельствуют о том, что злоумышленник увеличил свои возможности по несанкционированному доступу к защищаемой информации при неизменных исходных данных, которые реализует собственник по защите ИОД;

– третий режим моделирования осуществлялся с учетом следующих исходных данных:

$$q_{01} = 0,35, \quad q_{02} = 0,2, \quad q_{03} = 0,45,$$

$$R_{10} = 0,5, \quad R_{20} = 0,6, \quad R_{30} = 0,7,$$

характеризующих то, что повышаются как защитные механизмы собственника ИОД, так и возможности злоумышленника по несанкционированному доступу к защищаемой информации;

– четвертый режим моделирования осуществлялся при следующих исходных данных:

$$q_{01} = 0,25, \quad q_{02} = 0,25, \quad q_{03} = 0,25,$$

$$R_{10} = 0,75, \quad R_{20} = 0,75, \quad R_{30} = 0,75,$$

свидетельствующих о том, что защитные возможности собственника ИОД и возможности злоумышленника по несанкционированному доступу к защищаемой информации не изменяются.

Результаты математического моделирования представлены на рис. 2.

Наиболее благоприятные исходы для собственника ИОД соответствуют первому режиму моделирования (рис. 2, испытание 1), когда у собственника информации имеются существенные преимущества по защите своих информационных ресурсов по сравнению со злоумышленником.

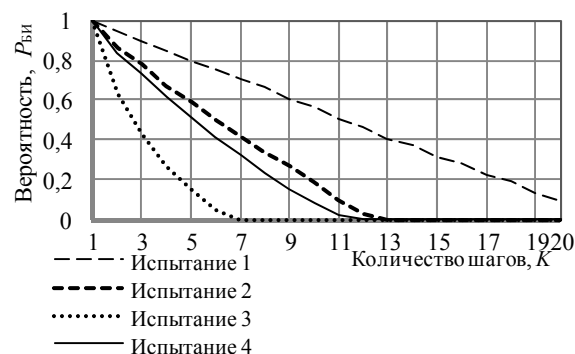


Рис. 2. Зависимость вероятности благополучного исхода от возможностей злоумышленника по несанкционированному доступу к защищаемой информации (q_{0i}), возможностей собственника по защите ИОД (R_{i0}) и K

В то же время видно (рис. 2, испытание 2), что даже незначительное увеличение возможностей злоумышленника по сравнению с испытанием 1, при неизменных защитных свойствах собственника ИОД, приводит к значительному уменьшению вероятности $P_{БИ}$. Так, в соответствии с рис. 2 уже на пятом шагу моделирования вероятность $P_{БИ}$ снижается с вероятности 0,8 до 0,59, а на девятом шагу вероятность $P_{БИ}$ снижается с 0,6 (испытание 1) до 0,28 (испытание 2).

Ещё более существенно наблюдается снижение вероятности $P_{БИ}$ для третьего режима испытания, когда защитные механизмы собственника ИОД уменьшаются. По сравнению с первым испытанием уже на пятом шагу моделирования указанная вероятность снижается с 0,8 (испытание 1) до 0,17 (испытание 3), а на девятом шагу указанная вероятность снижается с 0,6 до нуля.

Также в третьем испытании наблюдается еще более быстрое уменьшение вероятности благополучного исхода по сравнению с первыми двумя испытаниями.

Результаты четвертого режима моделирования (рис. 2, испытание 4) свидетельствуют о том, что когда защитные возможности собственника ИОД и возможности злоумышленника по несанкционированному доступу к защищаемой информации не изменяются, то вероятность $P_{БИ}$ в большей степени определяется возможностями злоумышленника по несанкционированному доступу к защищаемой информации.

Таким образом, в результате анализа проведенных исследований, изображенных на рис. 2, можно сделать следующие выводы:

– вероятность $P_{БИ}$ благополучного исхода при воздействии на АИС различных угроз безопасности ИОД от воздействия на нее угроз ИОД в значительной степени зависит как от возможностей злоумышленника по несанкционированному доступу к защищаемой информации, так и от возможностей собственника ИОД по защите своих информационных ресурсов;

– скорость снижения или роста вероятности $P_{\text{БИ}}$, как показывают результаты исследования, в большей степени определяется возможностями злоумышленника. Это обстоятельство накладывает на собственника ИОД высокую степень информированности о знаниях методов и средств, применяемых злоумышленником с целью выбора и применения таких защитных механизмов, которые обеспечивают гарантированную защиту информации.

Выводы

Разработан метод количественной оценки безопасности ИОД на основе Марковских случайных процессов для зависимых угроз.

Разработано программное обеспечение для исследования количественной оценки безопасности информации ограниченного доступа на основе Марковских случайных процессов.

Проведено исследование влияния вероятности благополучного исхода с учетом воздействия на АИС зависимых угроз безопасности ИОД и возможностей по их парированию.

Учет полученных результатов моделирования позволит собственнику ИОД разрабатывать эффективные мероприятия по предупреждению неоправданного ущерба при обращении с информацией, ограниченной в распространении.

Литература

1. Введение в информационную безопасность: учеб. пособие для вузов / А.А. Малюк, В.С. Горбатов, В.И. Королев и др. – М.: Горячая линия – Телеком, 2014. – 288 с.
2. Моделирование сложных атак на комплексные сети / Ф. Галиндо, Н.В. Дмитриенко, А. Карузо и др. // Безопасность информационных технологий. – 2010. – № 3. – С. 115–121.
3. Network Society: Aggregate Topological Models / A. Tikhomirov, A. Afanasyev, N. Kinash et al. // Umerov Communications in Computer and Information Science. – 2014. – Vol. 487. – P. 415–421.
4. A proposal framework for information security establishment focusing on risk evaluation and its optimum reduction based on standard. / E.A. M. Malayeri, N. Modiri, S. Jabbehdari, T. Behbahani // Advances in Information Sciences and Service Sciences. – 2012. – № 4 (7). – P. 1–11.
5. Росенко А.П. Внутренние угрозы безопасности конфиденциальной информации: методология и теоретическое исследование. – М.: КРАСАНД, 2010. – 160 с.
6. Росенко А.П. Метод определения вероятности несанкционированного доступа злоумышленника к кон-

фиденциальной информации // Доклады ТУСУРа. – 2012. – № 1(25), ч. 2. – С. 25–28.

7. Росенко А.П. Математическая модель определения вероятности последствий от реализации злоумышленником угроз безопасности информации ограниченного распространения / А.П. Росенко, И.В. Бордак // Изв. ЮФУ. – 2015. – №7(168). – С. 7–19.

8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016619790 / А.П. Росенко, И.В. Бордак, Н.С. Окулов – Заявка №201661601. Дата поступления 13 июля 2016 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 30 августа 2016 г.

Бордак Ирина Владимировна

Аспирант каф. прикладной математики и компьютерной безопасности (КПМКБ) института информационных технологий и телекоммуникаций Северо-Кавказского федерального университета
Тел.: +7-918-877-74-04
Эл. почта: irinabordak@mail.ru

Росенко Александр Петрович

Канд. техн. наук, доцент каф. КПМКБ
Тел.: +7-919-750-65-56
Эл. почта: rap.44@mail.ru

Bordak I.V., Rosenko A.P.

Development of a method for quantitative evaluation and prediction of information security with restricted access on the basis of Markov random processes

In this paper a method and software implementation are developed to determine the probabilities of the effects of the implementation of the attacker threats for the security of restricted information on the basis of Markov random processes when subjected to an automated information system of dependent threats. The proposed method and software-based Markov random processes showed the possibility to realize a quantitative evaluation of the safety the security of restricted information, which will allow using the obtained data to develop evidence-based organizational and preventive measures to improve protection of the security restricted information. Developed and justified practical recommendations, minimize material damage due to the choice of optimal strategies, the methods and remedies the security of restricted information.

Keywords: information security, threats, mathematical model, mathematical modeling, Markov random processes.

УДК 511.2

В.С. Мельман, Ю.В. Шабля, Д.В. Кручинин, В.В. Кручинин

Сравнительный анализ вычислительных способов нахождения коэффициентов ряда Тейлора в математических пакетах

Исследуется способ нахождения коэффициентов ряда Тейлора с использованием композит производящих функций. Также проводится сравнение способов нахождения коэффициентов ряда Тейлора различными математическими пакетами с новым способом, реализованным в виде библиотеки для Mathematica.

Ключевые слова: ряд Тейлора, коэффициенты ряда Тейлора, производящие функции, композиты производящих функций, коэффициенты производящих функций, математические пакеты, сравнительный анализ.

doi: 10.21293/1818-0442-2017-20-4-71-74

Числовым рядом или рядом называют бесконечную числовую последовательность. Ряды нашли своё применение как в теоретических исследованиях математического анализа, так и в численных методах: для решения дифференциальных уравнений, приближённого вычисления значений функций, определённых интегралов, в интерполяции, аппроксимации. Наибольшее применение на практике нашли степенные ряды. Это ряды, членами которых являются степенные функции аргумента x . Наиболее известными являются степенные ряды Тейлора.

Главной проблемой использования степенных рядов на практике является большая вычислительная сложность алгоритмов нахождения коэффициентов при степенях x .

Для работы с рядами на практике зачастую используют математические пакеты. Прикладные математические пакеты – это пакеты прикладных программ, используемые для численных и аналитических расчётов. Как правило, каждый математический пакет имеет свою реализацию и способы для вычисления коэффициентов ряда Тейлора.

Схожим понятием с рядом Тейлора является производящая функция. Производящие функции применяются в перечислительном комбинаторном анализе, теории вероятностей, математическом анализе [1, 2]. Производящая функция последовательности $\{a_n\}$ – это следующий формальный степенной ряд [1]:

$$a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n.$$

Формальным степенным рядам не придаётся числовых значений, и сходимость таких рядов не рассматривается. Если на производящую функцию наложить условие сходимости, то она будет являться рядом Тейлора.

В работах [3–5], был предложен новый метод нахождения коэффициентов производящих функций, основанный на композитах, который может быть использован для нахождения коэффициентов ряда Тейлора. Композиты – это коэффициенты степеней производящих функций [3]. Таким образом, определяя формулы нахождения композит для основных операций с производящими функциями и композиты для простейших производящих функций, будут по-

лучены формулы для нахождения коэффициентов сложных производящих функций. Данный способ является новым и нуждается в изучении, поэтому целью данного исследования является анализ способа нахождения коэффициентов производящих функций через композиты производящих функций.

Ранее в работе [6] для автоматизации нового способа была разработана модель нахождения коэффициентов производящих функций, на основе которой в [7] была реализована библиотека по работе с производящими функциями для математического пакета Mathematica.

Задачей данной работы является проведение сравнительного анализа способов нахождения коэффициентов ряда Тейлора, реализованных в библиотеке, со способами, используемыми в математических пакетах.

Подготовка к проведению сравнительного анализа

Для проведения сравнительного анализа был выбран ряд наиболее популярных математических пакетов: Wolfram Mathematica 11.0, Maxima 5.39.0, SageMath 7.6, Matlab R2017a Symbolic Math Toolbox, Maple 2016.2.

Поскольку три из пяти представленных математических пакетов являются проприетарным программным обеспечением, исходные коды их алгоритмов являются закрытыми, то посчитать теоретическую сложность алгоритмов разложения функции в ряд Тейлора не представляется возможным. Поэтому сравнительный анализ будет проводиться на основе эмпирически полученных данных.

Для сравнения нового метода с существующими необходимо определить критерии сравнения. Для анализа способов может возникнуть потребность в определении различных ресурсов, необходимых для вычисления, но чаще всего определяют время вычисления и затрачиваемую память [8].

Для сравнения способов было произведено тестирование, включающее в себя следующие этапы:

- составление базы функций, на основе которой будет проводиться тестирование;
- проведение измерения времени выполнения и затраченной памяти для существующих методов нахождения коэффициентов ряда Тейлора и нового метода для одинаковых функций;
- проведение сравнения результатов.

Для проведения тестирования была составлена тестовая база, состоящая из трёх разделов. Каждый из разделов отличается сложностью входящих в него функций. Первый раздел состоит из сложных функций, которые составлены из двух простейших функций и одной операцией над ними. Второй раздел состоит из сложных функций, которые составлены из трёх простейших функций и двумя операциями над ними. Третий раздел состоит из сложных функций, которые составлены из четырёх функций и трёх операций над ними. Каждый из разделов содержит по 10 функций. Для составления базы были взяты следующие функции: полиномы, рациональные, тригонометрические, гиперболические, логарифмические, экспоненциальные функции, радикалы; а также операции сложения, произведения и суперпозиции над данными функциями. Тестовая база приведена в табл. 1, 2.

Проведение тестирования и анализ результатов

В качестве существующих методов нахождения коэффициентов ряда Тейлора использовались встроенные в математические пакеты алгоритмы, которые позволяют разложить заданную функцию в ряд Тейлора до заданного номера коэффициента. Для проведения измерения времени вычисления коэффициентов ряда Тейлора для заданной функции и затраченной памяти на вычисления также использовались встроенные в математические пакеты функции. Тестирование проходило на компьютере со следующими характеристиками: процессор Intel Core i3-6100U (2,3 ГГц), оперативная память DDR4 12 Гбайт.

Для каждой функции из тестовой базы было приведено измерение времени вычисления и затраченной памяти для разных методов нахождения коэффициентов ряда Тейлора для n равных от 10 до 100 с шагом 10.

Для сравнения полученных результатов были подсчитаны средние значения времени выполнения и затраченной памяти. На рис. 1 приведена зависимость времени выполнения от n в секундах.

Таблица 1

Первый раздел тестовой базы	
№	Функция
1	$\tan(\sin(x))$
2	$\frac{x}{1-x} \cdot (\cos(x)-1)$
3	$\frac{1-\sqrt{1-4x}}{2} + \arctan(x)$
4	$\ln(1+x) + x \cdot e^x$
5	$\sin(3x-2x^2+x^3)$
6	$\cosh(x) \cdot \frac{x}{1-x}$
7	$x \cdot \sqrt{1-x} + \frac{x}{(1-x)^2}$
8	$\cos(x) + \sec(x) - 2$
9	$\frac{x}{1-x-x^2} \cdot \arctan(x)$
10	$\sqrt{1-x} \cdot \ln(1+x)$

Таблица 2

Второй и третий разделы тестовой базы		
№	Второй раздел тестовой базы	Третий раздел тестовой базы
1	$\tan(\sin(x)) + \arctan(x)$	$\tan(\sin(x)) + \frac{1-\sqrt{1-4x}}{2} + \arctan(x)$
2	$\sin(x) + \frac{x \cdot (\cos(x)-1)}{1-x}$	$\frac{\sin(x)}{1-\sin(x)} + (\ln(1+x) \cdot x \cdot \sqrt{1-x})$
3	$\frac{1-\sqrt{1-4x}}{2} \cdot \ln(1+x) + (2x+3x^2)$	$(x \cdot \sqrt{1-4x} + x \cdot e^x) \cdot \left(\left(\frac{x}{1-x} - x^2 \right) + (12x-3x^2) \right)$
4	$\sin(5x+3x^2+x^3) + \frac{x}{1-x}$	$\left(x \cdot e^x \cdot \frac{x}{1-x} \right) + \left(\ln(1-x) \cdot \frac{x}{1-x-x^2} \right)$
5	$\cosh(x) \cdot \frac{x}{1-x} + \arctan(x)$	$\frac{1-\sqrt{1-4x}}{2} \cdot (1-\sqrt[4]{1-x}) + \frac{x+x^2}{(1-x)^3} + (-17x-3x^2+10x^3)$
6	$\cos(x) + \sec(x) + x \cdot e^x - 2$	$((e^x - 1) + \arctan(x)) \cdot (\ln(1+x) + x^2)$
7	$\frac{x}{1-x} \cdot (\cos(x)-1) + x \cdot \sqrt{1-4x}$	$(\cos(x) + \sec(x) - 2) + \left(\frac{x}{1-x-x^2} + \frac{x+x^2}{(1-x)^3} \right)$
8	$\ln(1+x) \cdot x \cdot e^x + \frac{x}{1-x-x^2}$	$\left((\cosh(x)-1) \cdot \frac{x}{1-x} \right) + ((e^x - 1) \cdot (-7x+x^2+4x^3))$
9	$(11x-4x^2-2x^3) \cdot \left(\sin(x) + \frac{1-\sqrt{1-4x}}{2} \right)$	$\left(\frac{x}{1-x} \cdot (\cos(x)-1) \right) + \left(\left(\frac{x}{1-x} - x^2 \right) \cdot (3x-2x^2) \right)$
10	$(e^x - 1) \cdot \left(\frac{1-\sqrt{1-4x}}{2} + \frac{x}{1-x} \right)$	$\frac{x}{1-x-x^2} \cdot \arctan(x) + (x \cdot \sqrt{1-4x} \cdot \ln(1+x))$

Из рис. 1 видно, что наиболее время на вычисление коэффициентов ряда Тейлора затрачивает математический пакет Matlab (от 0,0042 до 0,83 с), затем библиотека (от 0,0025 до 0,75 с), Maxima (от 0,0047 до 0,35 с), Sage (от 0,017 до 0,29 с), Maple (от 0,0073 до 0,12 с), Mathematica (на уровне 0,000035 с).

Алгоритмы Matlab и библиотеки имеют квадратичную зависимость от количества элементов в ряде Тейлора ко времени вычисления, Maxima, Sage, Maple имеют линейную зависимость. У Mathematica нет зависимости времени выполнения от количества элементов, такие результаты можно объяснить наличием у Mathematica сложных, отличных от других математических пакетов алгоритмов, которые используют распараллеливание вычислений, это также можно наблюдать на рис. 2, на котором представлен

график затраченной на вычисления памяти» в мегабайтах.

Из рис. 2 видно, что Mathematica с увеличением количества элементов выделяет большее количество памяти относительно других математических пакетов и библиотеки, а именно от 0,037 до 0,57 Мб. Большее количество памяти затрачивает только Maxima (от 0,071 до 6,46 Мб), затем, Matlab (от 0,0069 до 0,079 Мб), Maple (от 0,0029 до 0,059 Мб), библиотека (от 0,0065 до 0,0023 Мб). Измерить память в Sage не удалось из-за нечувствительности функции измерения памяти к проводимым вычислениям. Алгоритмы Maxima имеют квадратичную зависимость от количества элементов в ряде Тейлора ко времени вычисления, Matlab, библиотека, Maple, Mathematica имеют линейную зависимость.

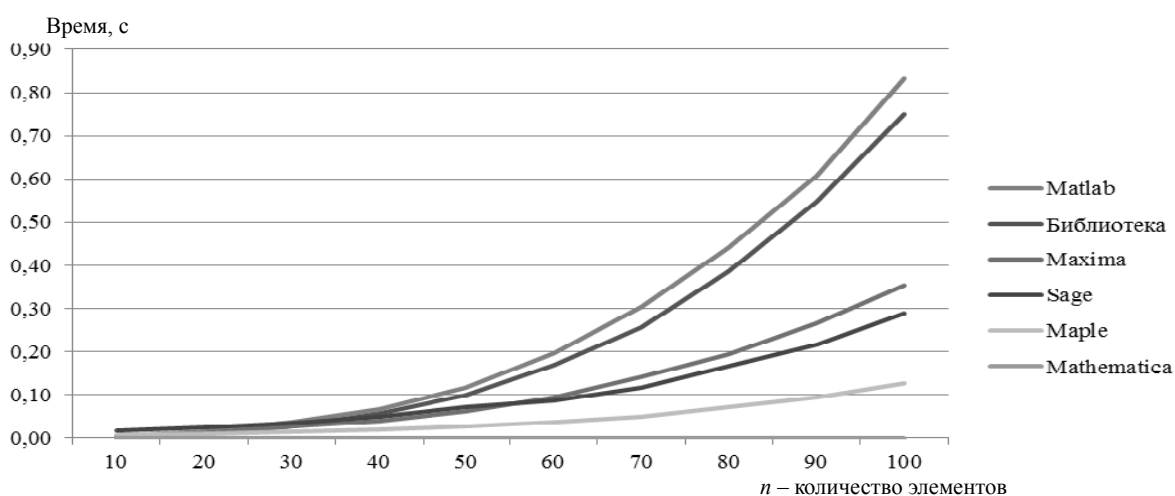


Рис. 1. График зависимости времени вычисления коэффициентов ряда Тейлора от n для функций библиотеки и математических пакетов

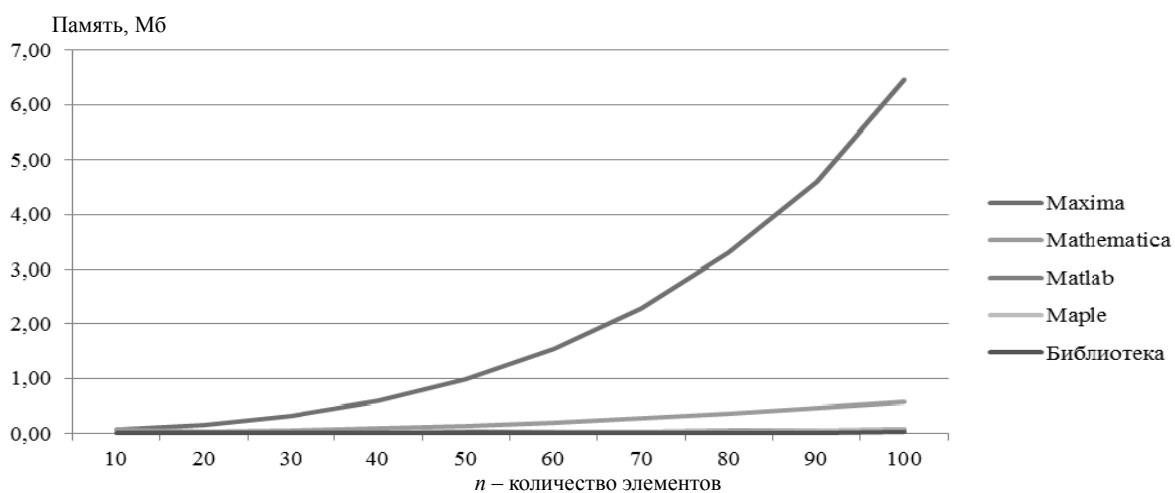


Рис. 2. График зависимости памяти, затраченной на вычисления коэффициентов ряда Тейлора, от n для функций библиотеки и математических пакетов

Заключение

Для нахождения коэффициентов ряда Тейлора при небольших n можно использовать любой из исследованных математических пакетов или библиотеку по работе с производящими функциями. Если для пользователя важна скорость вычислений при боль-

ших n , то предпочтительнее будет использовать Mathematica, потому что её вычислительные способы вероятнее всего используют распараллеливание. Если же необходимо проводить вычисление коэффициентов ряда Тейлора параллельно с другими вычислениями или на слабых машинах с ограничен-

ными ресурсами, то наиболее предпочтительно выглядит использование библиотеки или Maple за счёт использования маленького количества памяти.

Из проведённого исследования видно, что использование библиотеки для вычисления коэффициентов ряда Тейлора оправдано при определённых условиях. Также библиотека имеет открытый исходный код и может быть использована для других задач, так, например, она обладает функционалом для вычисления критериев простоты числа на основе свойств композиции производящих функций [9], для решения функциональных и итеративных уравнений [4], для вычисления различных полиномов [10].

В дальнейшем планируется реализовать параллельные вычисления библиотеки для ускорения поиска коэффициентов ряда Тейлора, реализовать библиотеку не только для Mathematica, но и для других приведённых математических пакетов, чтобы проверить, не удастся ли улучшить алгоритмы, используемые этими математическими пакетами. Планируется посчитать теоретическую сложность алгоритмов вычисления коэффициентов ряда Тейлора для свободно распространяемых математических пакетов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках базовой части государственного задания ТУСУРа на 2017–2019 гг. (проект № 2.8172.2017/8.9).

Литература

1. Ландо С.К. Лекции о производящих функциях. – М.: МЦНМО, 2007. – 144 с.
2. Wilf H.S. Generatingfunctionology. – Academic Press, 1994. – 226 p.
3. Кручинин В.В. Комбинаторика композиций и её приложения. – Томск: В-Спектр, 2010. – 156 с.
4. Кручинин В.В. Степени производящих функций и их применение / В.В. Кручинин, Д.В. Кручинин. – Томск: Изд-во Том. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2013. – 236 с.
5. Kruchinin V.V., Kruchinin D.V. Composita and its properties / V.V. Kruchinin, D.V. Kruchinin // Journal of Analysis and Number Theory. – 2014. – Vol. 2(2). – P. 1–8.
6. Мельман В.С. Моделирование процесса вычисления коэффициентов производящих функций / В.С. Мельман, Д.В. Кручинин, Ю.В. Шабля // Научный альманах. – Тамбов: Изд-во ООО «Консалтинговая компания Юком», 2016. – № 12-2 (26). – С. 220–224.
7. Мельман В.С. Разработка библиотеки по работе с производящими функциями в математическом пакете «Mathematica» / В.С. Мельман, Ю.В. Шабля, Д.В. Кручинин // Матер. Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР–2017», Томск, 10–12 мая 2017 г. – Томск: В-Спектр, 2017. – Ч. 4. – С. 215–217.

8. Алгоритмы: построение и анализ / Т.Х. Кормен, Ч.И. Лейзерсон, Р.Л. Ривест, К. Штайн. – 3-е изд.; пер. с англ., под ред. И.В. Красикова. – М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2013. – 1328 с.

9. Кручинин Д.В. Метод построения алгоритмов проверки простоты натуральных чисел для защиты информации / Д.В. Кручинин, В.В. Кручинин // Доклады ТУСУРа. – 2011. – № 2 (24). – С. 247–251.

10. Кручинин Д.В. Метод получения явных выражений полиномов на основе степеней производящих функций: дис. ... канд. физ.-мат. наук: – Красноярск, 2015. – 97 с.

Мельман Вадим Сергеевич

Студент каф. безопасности информационных систем (БИС) ТУСУРа
Тел.: +7-961-892-23-46
Эл. почта: vadiamylman@yandex.ru

Шабля Юрий Васильевич

Аспирант каф. комплексной информационной безопасности электронно-вычислительных систем (КИБЭВС) ТУСУРа
Тел.: +7-906-949-03-07
Эл. почта: syv@keva.tusur.ru

Кручинин Дмитрий Владимирович

Канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник каф. КИБЭВС
Тел.: +7-913-845-99-04
Эл. почта: kdvd@keva.tusur.ru

Кручинин Владимир Викторович

Д-р техн. наук, профессор каф. промышленной электроники ТУСУРа
Тел.: 8 (383-2) 42-30-67 (вн. 41-70)
Эл. почта: kru@ie.tusur.ru

Melman V.S., Shablya Yu.V.,
Kruchinin D.V., Kruchinin V.V.

Comparative analysis of computational methods for finding Taylor series coefficients in computer algebra systems

In this paper the method of finding the Taylor series coefficients using the generating functions composite was considered. Authors also compare the methods for finding the Taylor series coefficients with different computer algebra systems with a new method realized as a library for the Mathematica.

Keywords: Taylor series, Taylor series coefficients, generating functions, composite of generating functions, generating functions coefficients, computer algebra systems, comparative analysis.

УДК 004.75 (004.624)

Р.В. Мещеряков, О.И. Жуковский, П.В. Сенченко, Ю.Б. Гриценко, М.М. Милихин

Особенности архитектуры единого информационного пространства при управлении сложными технологическими процессами

Предложены решения, позволяющие обеспечить взаимодействие между компонентами автоматизированной системы управления подводной добычей с помощью береговой станции на основе параметрической модели подводного добычного комплекса (АСУ ПДК). Рассматриваются особенности архитектуры единого информационного пространства с целью объединения существующих источников данных, необходимых для совместного использования при управлении сложными технологическими процессами. В рамках проектирования архитектуры разрабатываемой системы предложено использовать сервис-ориентированный подход, предполагающий разделение системы на компоненты (сервисы). Описывается ролевая модель доступа к данным, положенная в основу определения политики безопасности.

Ключевые слова: единое информационное пространство, подводный добычный комплекс, автоматизированные системы управления, базы данных, сервис-ориентированная архитектура, ролевая модель доступа.

doi: 10.21293/1818-0442-2017-20-4-75-81

В современных условиях задача обеспечения функционирования морских сооружений и объектов нефтедобычи с использованием отечественных информационных технологий в соответствии с комплексной программой импортозамещения, принятой в Российской Федерации, на основе и с учетом опыта применения лучших мировых практик становится все более актуальной.

Исследования, представленные в данной статье, проводятся во исполнение требований Государственной программы Российской Федерации «Развитие судостроения и техники для освоения шельфовых месторождений на 2013–2030 годы». Ставится задача обеспечения работы морских сооружений и объектов нефтедобычи в части создания отечественных средств автоматизированных систем управления работой технологического оборудования объектов и систем (АСУ ТП) в соответствии с комплексной программой импортозамещения, принятой в Российской Федерации на основе и с учетом опыта использования лучших решений, существующих в мировой практике в данной предметной области.

Работа подводных добычных комплексов осуществляется удаленно с участием береговых или судовых систем дистанционного управления объектами с использованием автоматизированных рабочих мест на основе применения средств вычислительной техники и контроля состояния всей системы со стороны оператора в автоматическом, полуавтоматическом или ручном режимах.

Основной целью выполняемых исследований является обеспечение информационной поддержки проектирования дистанционного управления технологическим процессом морских сооружений и объектов нефтедобычи, используемых для освоения континентального шельфа (ДУ ТП МСОШ).

Единое информационное пространство АСУ ПДК

Применение надежных и эффективных решений универсального рабочего места оператора сис-

тем ДУ ТП позволяет снизить численность персонала, эксплуатирующего морской добычный комплекс, за счет автоматизации процессов контроля управления береговыми и подводными техническими средствами.

Универсальность рабочего места оператора обеспечивается за счет инсталляции в компьютерные средства программного обеспечения мониторинга и управления техническими средствами и экспертной системы моделирования технологических процессов для принятия решений, после чего АРМ становится функциональным элементом добычного объекта.

Построение универсального многофункционального АРМ оператора ДУ ТП на базе распределенных вычислительных систем позволяет значительно сократить объемы кабельных трасс, уменьшить размеры пультов за счет отображения информации о контролируемом оборудовании на экранах нескольких видеомониторов, осуществлять постоянный контроль технических средств, мониторинг работы берегового и подводного (дистанционно контролируемого) оборудования.

Обеспечить полноценное управление добычными комплексами невозможно без организации электронного взаимодействия между основными компонентами ДУ ТП МСОШ. Осуществить такое взаимодействие целесообразно за счет объединения существующих источников данных в единое информационное пространство (ЕИП), представляющее собой «совокупность автоматизированных информационных ресурсов, информационно-коммуникационных технологий их формирования, ведения и использования, а также организационных механизмов, обеспечивающих технологическое взаимодействие участников проекта и удовлетворение их информационных потребностей» [1]. Под автоматизированными информационными ресурсами (АИР) будем понимать базы и банки данных, актуализация

и предоставление доступа к которым осуществляются в соответствии с установленным регламентом с помощью информационно-коммуникационных технологий.

АИР, составляющие единое информационное пространство, можно классифицировать по различным признакам. Необходимо учесть, что такие ресурсы имеют различную степень структурированности, что, в свою очередь, означает возможность разделения АИР на атомарные информационные элементы и возможность фиксации их позиции в конкретном информационном ресурсе.

Построение ЕИП производится в соответствии с концепцией «непрерывного развития и поддержки жизненного цикла» – CALS (Continuous Acquisition and Life cycle Support). Согласно данной концепции следует провести автоматизацию информационной поддержки каждого этапа жизненного цикла конкретного изделия.

Другим аспектом развития рассматриваемого единого информационного пространства является «включение в его состав интеллектуальных подсистем, обеспечивающих поддержку принятия решений. Поэтому к составу и структуре единого информационного пространства предъявляются принципиально новые требования, затрагивающие как функциональность всех компонентов программного обеспечения, так и методики работы с ними» [1].

На рис. 1 представлены структура единого информационного пространства, основывающаяся на наборе баз данных, и информационные потоки автоматизированной системы управления технологическими процессами (АСУ ТП) для проектирования дистанционного управления производственного процесса морских объектов и объектов добычи нефти, используемых для освоения континентального шельфа.

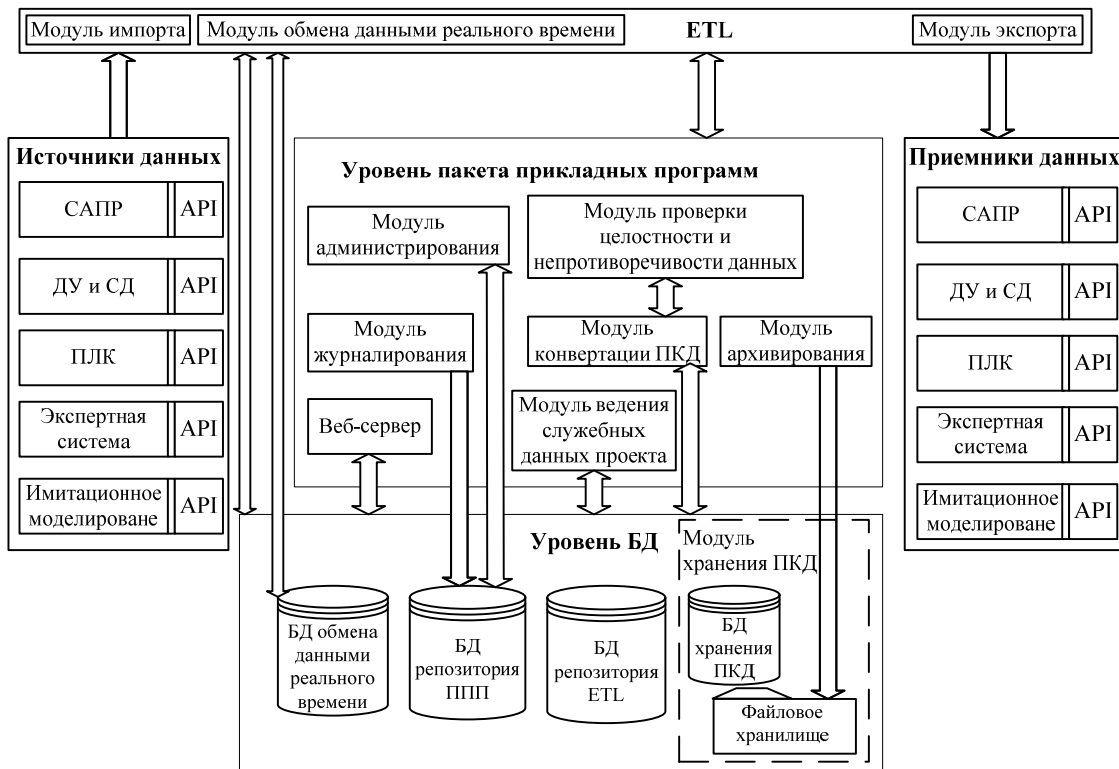


Рис. 1. Структура единого информационного пространства с набором БД

Основной задачей, встающей перед разработчиками при формировании ЕИП, является задача сопряжения данных информационных ресурсов, формируемых в различных прикладных программах. Фактически в применении к рассматриваемой предметной области необходимо реализовать информационную технологию с использованием специальных форматов обмена, которая смогла бы обеспечить интеграцию следующих программно-аппаратных комплексов:

– компонентов программного пакета АСУ ТП для проектирования дистанционного управления производственного процесса;

– экспертной системы для принятия решений диспетчерского круга;

– отладочных имитаторов;

– тренажерных комплексов для опытного образца универсального рабочего места оператора.

Как видно из рис. 1, источниками и приемниками данных являются принципиально отличающиеся друг от друга программные продукты:

1. Подсистема ДУ и СД (SCADA – Supervisory Control And Data Acquisition – диспетчерское управление и сбор данных) – подсистема диспетчерского управления (ДУ) и сбора данных (СД). Представленный программный пакет предназначен для раз-

работки и обеспечения функционирования в режиме реального времени систем, выполняющих сбор, обработку, отображение и архивирование разнородных данных об объекте управления.

2. САПР – система автоматизированного проектирования, используемая для проектирования объектов АСУ ТП.

3. Подсистема ПЛК – подсистема программируемого логического контроллера.

4. Экспертная система – программный продукт, включающий средство создания и настройки оптимизационной теоретической модели добычного комплекса. В режиме поддержки принятия решений модуль экспертной системы получает данные имитационной модели или фактические данные от объекта управления при помощи модуля сбора информации в реальном времени.

5. Модуль имитации – программное средство создания и настройки имитационных моделей. Данный модуль позволяет предоставить инструменты для описания алгоритмов формирования выходных сигналов и задания исходных условий моделирования. Модуль имитации обеспечивает расчет созданных имитационных моделей и управляет режимом их функционирования. В режиме поддержки принятия решений модуль экспертной системы получает данные имитационной модели или фактические данные от объекта управления в реальном времени. Полученные данные сравниваются с заложенными в базу знаний, и при наступлении предопределенных событий оператору выводится предупреждающее сообщение и рекомендация к действию.

Формирование баз данных единого информационного пространства

Разработка информационной технологии обеспечения взаимодействия внутри ЕИП может быть обеспечена за счет создания механизмов, направленных на формирование баз данных (БД) единого информационного пространства. Роль таких механизмов выполняют служебные модули подсистемы хранения и обмена проектно-конструкторскими данными (ПКД):

- администрирования;
- импорта/экспорта данных;
- конвертации ПКД;
- хранения ПКД;
- проверки целостности и непротиворечивости данных;
- обмена данными реального времени;
- журналирования;
- архивирования;
- ведения служебных данных проекта (данные пользователей, информация о проекте, набор правил, набор событий).

Базы данных единого информационного пространства представляются в виде «совокупности взаимосвязанных, хранящихся вместе данных при наличии такой организации и минимальной избыточности, которая допускает их использование оптимальным образом для одного или нескольких при-

ложений, при этом данные запоминаются и используются так, чтобы они были независимы от программ, использующих эти данные, а программы были независимы от способа и структуры хранения данных» [2]. Способ отражения в БД информации должен обеспечить достоверность и возможность ее прочтения, а также сохранность в сроки, установленные пользовательскими требованиями, и обеспечить возможность доступа к такой информации по состоянию на каждый рабочий день.

Формирование и ведение БД ЕИП должно основываться на выполнении определенных требований (правил), направленных на обеспечение свободного от избыточности, целостного, согласованного и бесконфликтного хранения информации сложной структуры и значительного объема. Целостность и согласованность БД можно рассматривать как соответствие информации, хранящейся в базе данных её структуре, внутренней логике, всем правилам её формирования и требованиям со стороны участников единого информационного пространства. Каждое правило, которое налагает некоторое требование (ограничение) на возможное состояние базы данных есть ограничение целостности. Порядок и соблюдение таких правил определяются регламентом ведения баз данных. Под регламентом [3] будем понимать совокупность требований, которые перечисляют и описывают по порядку этапы, которые должен предпринимать пользователь или группа пользователей для выполнения процесса с указанием (при необходимости) требуемых сроков выполнения.

На текущем этапе работ выделены следующие БД:

- БД обмена данными реального времени;
- БД хранения ПКД;
- БД репозитория пакета прикладных программ (ППП);
- БД репозитория программ обмена данными (ETL).

Под системой управления базами данных (СУБД) будем понимать «набор специальных программных приложений, предназначенных для обеспечения эффективного доступа к БД, используемый для предоставления только необходимой информации, обеспечения независимости от возможных изменений в структуре той части базы данных, которую не обрабатывает программа» [2]. В качестве СУБД подсистемы хранения ПКД и обмена данными предлагается использовать свободно распространяемую объектно-реляционную СУБД PostgreSQL. Файловое хранилище, изображенное на рис. 1, предназначено для хранения исходных файлов, полученных из источников данных, графических данных и архива журнала модуля журналирования.

Следует отметить, что данные между «Подсистемой хранения ПКД и обмена данными», источниками и приемниками данных передаются в виде XML-документов (XML – eXtensible Markup Language – расширяемый язык разметки [4]). Такие XML-документы формируются с помощью API (Application Programming Interface) – программного интерфейса,

позволяющего использовать внутренние библиотеки программ источников и приемников данных для формирования файлов выгрузки необходимого формата и загрузки данных в программу-приемник.

Архитектурные решения при организации взаимодействия в едином информационном пространстве

При проектировании архитектуры разрабатываемой АСУ ПДК целесообразно использовать сервис-ориентированный подход, который подразумевает декомпозицию системы на атомарные компоненты, или «сервисы», которые при условии наличия согласованных общих интерфейсов используют единые правила для определения вызова сервисов и правила взаимодействия между собой. В качестве сервиса или службы может выступать программный компонент, доступ к которому осуществляется посредством сети Интернет/Инtranет. Такой механизм реализует некоторую функцию с заранее согласованным интерфейсом.

Преимуществами использования сервис-ориентированной архитектуры (SOA – service-oriented architecture) являются [5]:

- сокращение временных и финансовых издержек, возникающих на всех этапах разработки программных приложений, вследствие упорядочивания процесса их разработки;
- модификация и адаптация к конкретной реализации существующего программного кода;
- обеспечение повышения масштабируемости и интероперабельности создаваемых программных систем;
- обеспечение реальной независимости от используемых платформ, применяемых при разработке языков программирования и другого инструментария;
- совершенствование технической поддержки, облегчение процесса управляемости и сопровождения внедряемых программных систем.

Касательно веб-ориентированных систем необходимо отметить, что наиболее эффективно принципы SOA реализуют архитектурные подходы WSA (Web Services Architecture) и REST (Representational State Transfer). Рассмотрим данные подходы в контексте построения и практической реализации сервис-ориентированной архитектуры разрабатываемой системы.

Веб-сервисы в архитектуре WSA базируются на открытых и широко используемых протоколах: HTTP, SOAP, XML, WSDL, UDDI. Представленные протоколы обеспечивают реализацию основных требований SOA, это означает, что сервис должен быть доступен для динамического обнаружения и вызову посредством UDDI, WSDL и SOAP, а также сервис должен использовать не зависящий от платформы интерфейс (XML). Протокол HTTP при этом должен обеспечивать режим функциональной совместимости (рис. 2).

WSA предоставляет способ реализации SOA, в которой службы взаимодействуют посредством обмена XML-сообщениями (XML-документами) с оп-

ределенной заранее схемой документа. Способы практической реализации веб-служб на сегодняшний день достаточно хорошо проработаны – на рынке программного обеспечения предлагаются как коммерческие, так и проприетарные и свободно распространяемые наборы веб-служб.

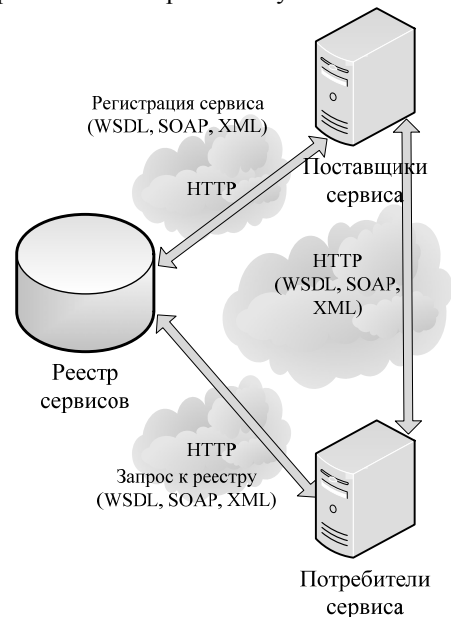


Рис. 2. Архитектура Web Services Architecture

К достоинствам рассматриваемой архитектуры можно отнести высокую степень надежности, обеспечиваемой поддержкой спецификации WS-Reliability, и достаточный уровень безопасности – поддержка спецификации WS-Security. Следует отметить, что при программной реализации приложения предполагается использование инструментальных (зачастую коммерческих) средств разработки, при отсутствии которых создать в короткие сроки простой и эффективный веб-сервис – задача достаточно сложная. Кроме этого, при разработке простых и повсеместно используемых функций веб-приложения, к которым можно отнести отображение данных и запросы на предоставление атрибутивной информации, сервис будет достаточно ресурсно-затратным: увеличится время отклика и будет отмечаться определенная избыточность передаваемых данных. При большом количестве обращений к сервису это практически гарантированно приведет к перегруженности вычислительных ресурсов и увеличению сетевого трафика. По этой причине в качестве альтернативной и более простой реализации сервис-ориентированной архитектуры рассматривают подход REST.

В REST-архитектуре (рис. 3) каждая система может быть представлена отдельными ресурсами, имеющими свое собственное состояние. При этом такая система для масштабируемости не обеспечивает хранение состояния клиентского процесса. Ресурсы представлены стандартными time-типами (типами данных, передаваемыми посредством сети Интернет с применением стандарта, описывающего

передачу различных типов данных по электронной почте). Для обеспечения доступа к конкретному ресурсу используются методы HTTP (GET, PUT, POST, и DELETE). Обеспечение передачи пакета метаданных реализуется с помощью HTTP-заголовков, представленных в виде *time*-типов. Обеспечение кеширования, прокси и авторизация также выполняются через протокол HTTP.

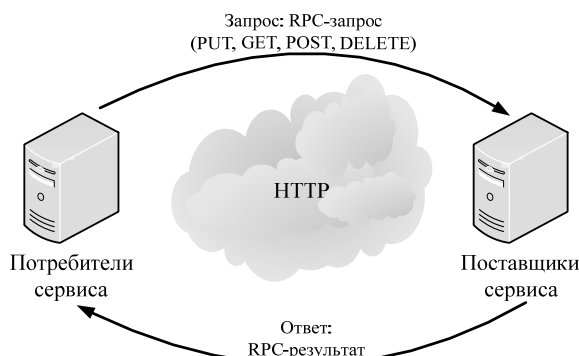


Рис. 3. Архитектура REST (Representational State Transfer)

Анализируя представленные архитектурные решения, можно сделать вывод о том, что, оптимизируя распределение функциональных задач между SOA и REST-сервисами, можно значительно повысить эффективность использования сервис-ориентированного подхода при разработке веб-сервера ЕИП. Данное решение позволяет снизить время выполнения критических для системы функций, значительно сократить сетевой трафик, а также в ряде случаев значительно снизить издержки времени на разработку проекта АСУ ТП.

Организация обеспечения безопасности в едином информационном пространстве

Немаловажной задачей при организации взаимодействия внутри единого информационного пространства является задача обеспечения безопасности доступа к данным. Одним из основных моментов, определяющих успешное решение данной задачи, является применение формальных моделей безопасности. Наиболее важным при этом является практическое применение формальных моделей в процессе проектировании программных систем контроля и управления доступом к объектам системы.

Модели информационной безопасности можно представить как «формальное описание политики безопасности информационной системы, заключающееся в определении условий, которым должно подчиняться поведение системы, выработка критерия безопасности и проведение формального доказательства соответствия системы этому критерию при соблюдении установленных правил и ограничений» [5].

В широком многообразии формальных моделей безопасности отдельное место занимают модели управления доступом к разнородным данным программной системы. Такие модели используются для решения задач разграничения прав доступа к различным базам данных электронных ресурсов единого информационного пространства.

Наиболее распространенными в практическом применении формальными моделями управления доступом являются дискреционные, мандатные и ролевые модели, представленные в [6–11]. В литературе [5, 12] подробно описываются сильные и слабые стороны таких моделей. На основании этих данных можно сделать вывод, что наиболее предпочтительным вариантом использования в рамках данного проекта является ролевая модель, которая представляет собой модифицированную и значительно усовершенствованную модель Харрисона–Руззо–Ульмана [13]. При этом необходимо отметить, что такую модифицированную модель нельзя отнести в полной мере ни к «дискреционным», ни к «мандатным» моделям. Это обусловлено тем, что управление правами доступа, реализованное на ее основе, осуществляется как на основе матрицы полномочий (прав доступа) для выделенных пользовательских ролей, так и с помощью определенных правил, регламентирующих назначение ролей конечных пользователей и их активацию непосредственно во время сеансов [5].

В описываемой ролевой модели выделяются два фундаментальных понятия: «пользователь», замещающее классическое понятие «субъект», и «роль». Под «пользователем» понимают человека, непосредственно взаимодействующего с системой и выполняющего определенный набор операций в рамках своих служебных обязанностей. Под «ролью» понимают активно действующую в программной системе некую «абстрактную сущность», для которой определен набор ограничений и логически связанных полномочий, необходимых для выполнения определенных действий в системе. Описываемый подход наиболее точно соответствует реальным условиям, при которых конечные пользователи действуют не от своего личного имени, а выполняют определенные регламентированные задачи в рамках своих обязанностей.

Таким образом, вполне логично управление правами доступа и назначение различных полномочий выделять не «реальным» пользователям (физическим лицам), а «абстрактным» ролям, фактически представляющим участников процесса обработки информации – пользователям единого информационного пространства.

При внедрении политики управления доступом, основанной на ролевой модели, процесс разбивается на две стадии:

1. Для каждой определенной роли необходимо указывать полный спектр полномочий, представляющий собой набор прав доступа к объектам системы.
2. Для каждого пользователя, зарегистрированного в системе, назначается перечень доступных ему ролей.

Использование ролевой модели при проектировании информационной технологии обеспечения взаимодействия внутри ЕИП позволит создать программное обеспечение информационной безопасности, для которого определены следующие функциональные возможности:

- наличие регламентного доступа непосредственно к базе данных и функциональной составляющей базы данных единого информационного пространства;

- обеспечение ролевого доступа к данным ЕИП на основании выделения администратором набора объектов, групп объектов, функций и организаций-подрядчиков;

- аудит активности конечных пользователей в среде ЕИП. Основным набором контролируемых действий при этом являются: создание объектов предметной области, просмотр сведений о проектных объектах, модификация атрибутивной информации, удаление данных;

- назначение конечным пользователям и группам пользователей прав на элементы пользовательского интерфейса;

- назначение следующих режимов (параметров) доступа ролям к объектам:

- 1) режим назначения прав через объекты. Такой режим целесообразно использовать при необходимости назначения нескольким ролям права на один конкретный объект;

- 2) режим назначения прав через роли. Его целесообразно использовать при назначении одной роли права на несколько объектов;

- регистрация конечного пользователя в среде единого информационного пространства;

- определение конечного пользователя как члена группы;

- определение конкретных прав каждого члена группы на доступ к проектным данным в соответствии с набором работ, в соответствии с указанной областью изделия в проекте, в соответствии с типом объектов проектируемого изделия;

- определение прав доступа к технологическим возможностям системы для членов группы, представленных как функций проекта;

- формирование критерияльного запроса на фильтрацию данных сеанса пользователя в соответствии с текущими правами доступа данного пользователя;

- определение набора действий с данными ЕИП, включаемых в набор аудита;

- формирование регламентных и произвольных отчетов об активности пользователей при получении доступа к объектам ЕИП и действиям над этими объектами в определенный момент времени.

Фактически ролевая модель доступа, положенная в основу определения политики информационной безопасности, является неотъемлемой частью АСУ ПДК, функционирующей в сложной организационной структуре с большим количеством пользователей, выполняющих определенный набор функций в рамках своих служебных обязанностей и наделенных в связи с этим различными правами доступа и набором полномочий. Все это соответствует современным требованиям к надежному хранению и доступу к данным единого информационного пространства.

Заключение

В представленной работе рассмотрены некоторые ключевые моменты создания единого информационного пространства, необходимого для эффективного выполнения сложного технологического проекта. Представленный анализ возможных архитектурных решений ведения базы данных ЕИП показывает нестареющую эффективность сервис-ориентированного подхода, особенно в комплексе с веб-ориентированной организацией доступа к данным.

Анализ моделей доступа к сложноорганизованному данным представляет преимущества ролевой модели в случае многослойной структуры технологической информации, составляющей основу базы данных ЕИП.

Предлагаемые решения основаны на опыте авторов, полученном в ходе выполненных ранее крупных проектов, связанных с разработкой информационных технологий.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минпромторга России в рамках выполнения Государственного контракта № 16411.1810190019.09.015 от 07.11.2016 г. «Разработка автоматизированной системы управления подводной добычей с помощью береговой станции на основе параметрической модели подводного добычного комплекса, разработка проекта подводного добычного комплекса и виртуального макета его системы управления».

Литература

1. Создание единого информационного пространства машиностроительного предприятия на основе облачных технологий / А.В. Волгин, И.В. Гусев, С.В. Куликов и др. // Вестник ВГТУ. – 2012. – № 6. – С. 44–47.
2. Сенченко П.В. Организация баз данных: учеб. пособие. – Томск: Том. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2004. – 170 с.
3. Юридический словарь [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://dic.academic.ru/dic.nsf/lower/17887>, свободный (дата обращения: 28.11.2015).
4. XML. Beginning XML / Д. Хантер, Д. Рафтер и др. – М.: Вильямс, 2009. – 1344 с.
5. Гриценко Ю.Б. Геоинформационные технологии мониторинга инженерных сетей / Ю.Б. Гриценко, Ю.П. Ехлаков, О.И. Жуковский. – Томск: Изд-во ТУСУРа, 2010. – 148 с.
6. Гайдамакин Н.А. Разграничение доступа к информации в компьютерных системах. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2003. – 328 с.
7. Ferraiolo D. Introduced formal model for role based access control / D. Ferraiolo, D. Kuhn // 15th national computer security conference. – Oct 13–16, 1992. – P. 554–563 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://csrc.nist.gov/groups/sns/rbac/documents/role_based_access_control-1992.html, свободный (дата обращения: 10.02.2015).
8. ISO / IEC 17799:2000 «Information technology – information security management» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/atalogue_detail.htm?Cnumber=33441, свободный (дата обращения: 25.05.2017).
9. LaPadula L. Secure Computer Systems: A Mathematical Model / L. LaPadula, J. Elliott [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.albany.edu/acc/>

courses/ia/classics/bellla-padula1.pdf, свободный (дата обращения: 25.05.2017).

10. McLean John. Security models / John McLean // Encyclopedia of software engineering [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://citeseerx.ist.psu.edu/view doc/summary?doi=10.1.1.34.8561>, свободный (дата обращения: 10.06.2017).

11. McLean John. The Specification and Modeling of Computer Security / John McLean // Computer. – 1990. – Vol. 23, No. 1. – P. 9–16.

12. Gritsenko Y. B. Model of role-based access to spatial data of electronic master plan / Y.B. Gritsenko, M.M. Milikhin, P.V. Senchenko, O.I. Zhukovsky // AICT 2015, Proceedings. – 2015. – P. 196–200. – doi: 10.1109/ICAICT.2015.7338545.

13. Harrison M. Monotonic protection systems / M. Harrison, W. Ruzz // Foundation of computation secure. – 1978. – P. 337–363.

Сенченко Павел Васильевич

Канд. техн. наук, доцент, декан
факультета систем управления ТУСУРа
Тел.: +7-906-947-82-83
Эл. почта: pvs@tusur.ru

Гриценко Юрий Борисович

Канд. техн. наук, доцент,
начальник инновационного управления ТУСУРа
Тел.: +7-905-990-95-49
Эл. почта: innovation@tusur.ru

Милихин Михаил Михайлович

Аспирант каф. АОИ
Тел.: +7-999-619-38-90
Эл. почта: milikhin@gmail.com

Мещеряков Роман Валерьевич

Д-р техн. наук, профессор,
проректор по научной работе и инновациям ТУСУРа
Тел.: +7 (382-2) 51-43-02
Эл. почта: mrv@tusur.ru

Жуковский Олег Игоревич

Канд. техн. наук, ст. науч. сотр., доцент каф.
автоматизации обработки информации (АОИ) ТУСУРа
Тел.: +7-913-855-47-82
Эл. почта: zhukol54@gmail.com

Meshcheryakov R.V., Zhukovskiy O.I., Senchenko P.V.,
Gritsenko Yu.B., Milikhin M.M.

Architecture features of a common information space to manage complex technological processes

This paper presents solutions that can be used to interlink components of an automated subsea production control system for a shore station based on the parametric model of a subsea production complex. Features of architecture of a common information space for the purpose of association of the existing data sources necessary for sharing at management of difficult technological processes are considered. Based on division of a system into components (services), the service-oriented approach is discussed as the best choice in architecture design of a new system. The paper discusses the role-based data access model as the basis for the security policy.

Keywords: common information space, subsea production complex, automated control system, databases, service-oriented architecture, role-based access control.

УДК 004.023

М.М. Милихин, Ю.Б. Гриценко, Ю.А. Шурыгин

Методика организации процесса мониторинга торговых и промышленных объектов с использованием геоинформационных технологий

Рассмотрены проблемы, с которыми сталкиваются организации, занимающиеся обслуживанием сети территориально распределенных подконтрольных торговых и промышленных объектов. В условиях отсутствия единой платформы для сбора и обработки данных с учетом требований заинтересованных сторон в процессе мониторинга применяются различные программные средства и информационные технологии, что увеличивает фрагментацию и дублирование данных и затрудняет совместный доступ к актуальным данным в рамках предметной области. Проведен анализ научной литературы, на основании которого сформулирована структура процесса мониторинга. Сделан вывод о том, что особенности рассматриваемой предметной области требуют развития существующих подходов к организации методик сбора, хранения и последующего анализа сведений о подконтрольных объектах. Предложена методика организации мониторинга торговых и промышленных объектов с использованием геоинформационных технологий, которая позволяет решить выявленные проблемы процессов ведения базы геоданных подконтрольных территориально распределенных объектов за счет применения веб-ГИС. Разработанная методика апробирована на примере реальной задачи мониторинга подконтрольных торговых объектов и может быть использована для решения задач ведения базы пространственно-атрибутивных данных территориально распределенных объектов в других предметных областях.

Ключевые слова: мониторинг торговых объектов; мониторинг промышленных объектов; веб-ориентированные геоинформационные системы; пространственно-атрибутивные данные.

doi: 10.21293/1818-0442-2017-20-4-82-86

Организации, занимающиеся обслуживанием сети территориально распределенных торговых или промышленных объектов, в ходе своей деятельности сталкиваются с необходимостью проведения периодических выездных работ на подконтрольных объектах. Необходимость работ может быть обусловлена действующими нормативно-правовыми актами или требованиями промышленной безопасности. Так, системы охранно-пожарной сигнализации и пожаротушения требуют проведения периодического своевременного технического обслуживания. Сроки перезарядки и проверки средств первичного пожаротушения предусмотрены действующим на территории Российской Федерации сводом правил [1, 2], а здания, не подвергающиеся своевременно обследованию технического состояния и экспертизе промышленной безопасности, характеризуются повышенным риском возникновения аварийных ситуаций [3].

Отметим, что помимо нормативно-правовых документов контрольные сроки проведения мониторинга могут быть также установлены принятым техническим регламентом или эксплуатационной документацией соответствующего торгового или промышленного оборудования, а в случае решения маркетинговых задач могут быть заданы лицом, принимающим решения, с учетом целей и методик проведения конкретного маркетингового исследования.

Мониторинг территориально распределенных объектов

Под мониторингом будем понимать функцию постоянного наблюдения за каким-либо объектом, процессом или явлением с целью выявления его состояния и тенденций изменения этого состояния, а также с целью выявления соответствия модели или исходному положению [4].

Описанная в научной литературе [5–10] структура процесса мониторинга может быть представлена как последовательность четырех основных этапов:

- 1) постановка задач мониторинга;
- 2) выбор объектов мониторинга;
- 3) формирование индивидуальных заданий на мониторинг для полевых работников;
- 4) проведение выездных работ.

Рассмотрим каждый из этих этапов более подробно.

Постановка целей мониторинга предполагает формулирование задач и формы отчетности, которая в дальнейшем будет использована полевыми работниками при проведении выездных работ.

Выбор объектов мониторинга предполагает формирование совокупности объектов мониторинга на основе базы данных подконтрольных организаций в пределах целевого региона мониторинга и последующую фильтрацию в соответствии с принятыми нормативно-правовыми документами только тех объектов, которые необходимо посетить при проведении работ.

Результатом этапа формирования индивидуальных заданий является разбиение объектов мониторинга на кластеры, соответствующие отдельным полевым работникам или бригадам. При этом в рамках каждого кластера необходимо выбрать оптимальное время и маршрут следования работников с учетом особенностей дорожной ситуации и графика работы клиентских организаций.

Завершающим этапом работы является непосредственное проведение выездных работ, по результатам которых будет сформирована отчетность о результатах мониторинга.

Выявленная структура процесса позволяет сформулировать следующие требования, которые необходимо удовлетворить в рамках отдельных этапов мониторинга:

- менеджер, отвечающий за организацию мониторинга, может формировать уникальную форму отчетности для полевых работников в рамках каждого отдельного проекта;
- форма отчетности о результатах выездных работ может использоваться повторно в разных проектах;
- количество работников, участвующих в проведении выездных работ, может варьироваться от одного человека до нескольких бригад, работающих параллельно;
- менеджер в соответствии с установленными регламентами определяет выборку территориально распределенных объектов, на основании которой в дальнейшем будут сформированы индивидуальные задания на мониторинг для технического персонала;
- менеджер выдает задание бригаде технического персонала в форме кластера объектов, которые необходимо посетить, и в форме сбора данных о результатах мониторинга, которую необходимо заполнить для каждого объекта;
- маршрут технического персонала внутри кластера должен быть спланирован оптимальным образом для минимизации временных и финансовых издержек;
- форма сбора данных о результатах мониторинга состоит из полей, каждое из которых предназначено для заполнения данными определенного типа и формата, и может включать также фотографии объекта мониторинга или другие сопутствующие электронные документы;
- по окончании обхода кластера работник передает результаты менеджеру для дальнейшей обработки и проведения анализов результата выполненных работ.

В условиях отсутствия единой платформы для сбора и обработки данных для выполнения отдельных функциональных требований исполнителей применяются различные программные средства и информационные технологии. Перечисленные выше особенности предметной области позволяют выявить ряд проблем, возникающих при проведении исследования.

Отсутствие единого стиля заполнения форм вследствие отсутствия единых справочников-классификаторов приводит к тому, что однотипные данные заполняются работниками в разном стиле. Возникновение проблем вероятно в случае необходимости качественной оценки какого-либо аспекта функционирования объекта мониторинга, возможности использования разных единиц измерения для количественных характеристик или при использовании работниками разных форматов данных для оценки одних и тех же параметров.

Кроме того, список объектов мониторинга, подлежащих обходу каждым аудитором, необходимо

формировать вручную для каждого нового задания, что также создает дополнительные временные издержки для менеджера, при этом возможности оптимизации методов ручного формирования кластеров значительно ограничены.

Организация полевой работы аудиторов требует наличия программных продуктов, предоставляющих возможности сбора отчетности от полевых работников с использованием форм установленного вида, просмотра задания, выданного менеджером, а также ГИС общего назначения, предоставляющей возможности навигации по заданным точкам. Для формирования отчета о выполнении задания на мониторинг обычно применяются специализированные программные продукты для мобильных устройств. Форматом обмена данными между программными системами в таком случае, как правило, выступают электронные таблицы. Обработка таких таблиц и приведение полученных данных к единому стандарту требуют дополнительных временных затрат. Кроме того, хранение больших объемов данных и необходимость организации доступа сотрудников компании к актуальным версиям документов предполагают наличие регламента синхронизации данных между рабочими станциями сотрудников и специального программного обеспечения для выполнения такой синхронизации.

Отчетность по результатам мониторинга может быть представлена в виде электронных таблиц или файлов в форматах, поддерживаемых распространенными инструментальными ГИС, и, таким образом, требует специализированных программных средств для ее просмотра.

Методика мониторинга торговых и промышленных объектов с использованием геоинформационных технологий

Для решения задачи организации процесса мониторинга подконтрольных торговых и промышленных объектов при выполнении сервисных работ с учетом выявленных требований была разработана оригинальная методика с использованием геоинформационных технологий.

Применение веб-ориентированных геоинформационных технологий позволяет задействовать ГИС-сервис в качестве информационной основы разработанной методики. Методика предполагает участие всех основных участников процесса: руководства компании, менеджера проекта и технического персонала, – в рамках последовательного выполнения нескольких этапов аудита, включающих постановку задач и формирование форм отчетности о выполнении работ, выбор оптимальной маршрутной сети мониторинга и назначение заданий аудиторам. Алгоритм постановки задачи выбора маршрутной сети представлен на рис. 1.

Основные этапы мониторинга

1. Постановка целей мониторинга.

Постановка целей мониторинга предполагает формулировку целей и задач исследования в виде запросов заинтересованных сторон, которые будут

служить основой для формирования списка отчетных документов по проекту.

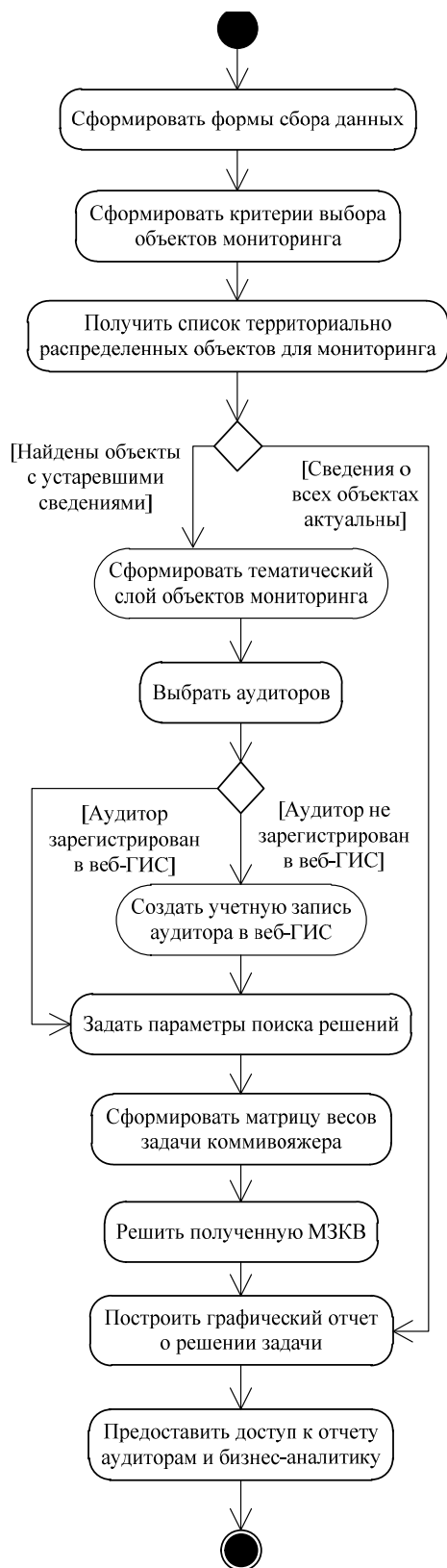


Рис. 1. Алгоритм постановки задачи выбора маршрутной сети мониторинга

Отчетность по результатам мониторинга может быть представлена в аналитической или графиче-

ской форме, а структура отчетности, в свою очередь, может быть представлена в виде набора описаний необходимых полей или тематических слоев. В случае проведения повторного аудита может быть выбрана ранее использованная форма сбора данных, которая в случае необходимости может быть модифицирована в соответствии с новыми требованиями к данным.

Структура входных данных задается в виде шаблона карточки описания объекта мониторинга, содержащего все необходимые и достаточные для формирования отчетности по результатам текущего мониторинга поля, характеризующиеся определенным типом данных, накладываемыми ограничениями на возможные значения поля, названием и принадлежностью к некоторой группе характеристик.

Форма сбора данных совместно с задачами исследования позволяет задать перечень целевых торговых и промышленных объектов, сведения о состоянии которых будут необходимы для формирования отчетности по результатам мониторинга. Генерация совокупности предполагает выборку всех объектов, удовлетворяющих некоторому набору критериев, которые, в свою очередь, должны быть основаны на выявленных ранее задачах и структуре выходных данных.

2. Выбор объектов для исследования.

Система веб-ГИС в соответствии со структурой выходных данных и имеющимся на текущий момент описанием объектов мониторинга производит автоматическую фильтрацию всех объектов, содержащих незаполненные или устаревшие сведения. На основании полученной выборки объектов мониторинга формируется перечень точек, которые необходимо посетить агентам для актуализации первичных данных исследования. Такой перечень включает основные атрибутивные и пространственные характеристики, необходимые для выдачи заданий техническому персоналу. Сформированный перечень объектов, подлежащих обходу в рамках проведения полевых работ, должен быть затем сохранен в виде отдельного тематического слоя веб-ГИС.

3. Формирование индивидуальных заданий для технического персонала.

После определения выборки объектов, которые необходимо посетить, происходит формирование заданий для технического персонала. Исходная выборка разбивается на кластеры, соответствующие отдельным полевым работникам. В рамках каждого кластера выбирается оптимальное время и маршрут следования агента с учетом особенностей дорожной ситуации и графика работы торговых точек. При этом формулировка задания и выбор оптимальной маршрутной сети для полевых работников в рамках мониторинга подконтрольных объектов предполагает наличие активного взаимодействия между основными участниками процесса – менеджера проекта и аудитора – с использованием в качестве инструментов достижения поставленных целей веб-ГИС и программной подсистемы выполнения расчетов.

Менеджер выбирает аудиторов для проведения полевых работ и устанавливает дополнительные критерии поиска решения задачи нахождения оптимальной маршрутной сети мониторинга.

К таким критериям относятся дата проведения полевых работ и параметры поиска оптимальных маршрутов для транспортных средств аудиторов. После этого постановка задачи передается в программную подсистему выполнения расчетов, которая выполняет необходимые вычисления, используя реализованный эвристический алгоритм решения ЗКВ. Готовое решение задачи в виде тематического отчета загружается в веб-ГИС [11]. Доступ к сформированному отчету предоставляется всем участвующим в проекте сотрудникам в соответствии с их ролью. Аудиторы получают задание в виде тематического слоя кластера объектов, которые необходимо посетить, и формы сбора данных, которые необходимо заполнить для каждого объекта.

4. Осуществление сбора данных.

Завершающим этапом работы является сбор данных о функционировании подконтрольных объектов мониторинга полевыми работниками и загрузка полученных данных в централизованное хранилище данных для последующей обработки. Аудиторы последовательно посещают все точки маршрута в установленном порядке и заполняют формы сбора данных, представленные в виде карточек пространственных объектов в пользовательском интерфейсе веб-ГИС-клиента. Для каждого объекта мониторинга веб-ГИС-сервер по запросу веб-ГИС-клиента формирует структуру карточки объекта и сохраняет значения всех заполненных аудитором характеристик, а также прикрепленные документы и фотографии в хранилище пространственно-временных данных.

Введенные аудитором атрибутивные данные становятся автоматически доступны менеджеру проекта в режиме онлайн. Менеджер может наблюдать вносимые полевыми работниками изменения как в формате исходных данных, заполненных при посещении объекта мониторинга, так и в виде специально сформированных для конкретного проекта графических отчетов.

По завершении сбора данных доступ к таким графическим отчетам может быть предоставлен руководству компании в системе веб-ГИС.

Апробация методики мониторинга территориально распределенных объектов

Апробация и внедрение методики организации процесса мониторинга торговых и промышленных объектов с использованием геоинформационных технологий были проведены в ООО «Все для общепита» (г. Новокузнецк), занимающимся поставками оборудования для пищевых производств, кафе и ресторанов, для решения задачи планирования и организации работ по установке и регламентному обслуживанию оборудования. Компания предоставляет услуги в рамках Новокузнецкой агломерации и юга Кемеровской области. Тестовая эксплуатация проводилась в период с января по март 2017 г. Для оценки

эффективности использования внедренной методики с октября по декабрь 2017 г. был введен учет времени, расходуемого на планирование и согласование графика выездных работ в рамках деятельности компании.

В рамках внедрения разработанной методики была сформирована база организаций, выполнявших заказ торгового оборудования в компании, и организаций, имеющих соглашения о проведении плановых работ по техническому обслуживанию оборудования. Общее количество организаций составило 82 компании. Для каждой такой организации в системе веб-ГИС была заполнена карточка, содержащая основные сведения об организации, а также перечень оборудования, требующего проведения регламентных работ. При поступлении новых заказов на поставку оборудования в базу данных веб-ГИС вносились сведения о заказчиках, приобретенном оборудовании и желаемой дате проведения выездных работ по установке и настройке оборудования. На основании сформированных описаний карточек организаций в системе веб-ГИС были настроены тематические картографические отчеты, отображающие торговые объекты разными цветами, в зависимости от необходимости скорого проведения плановых работ. Кроме того, в системе фиксировались заявки на проведение внеочередного ремонта оборудования в случае его выхода из строя.

На основании тематических отчетов ежедневно формировались индивидуальные задания для технического персонала с учетом планового времени выполнения работ. Сотрудники использовали версию веб-ГИС для мобильного телефона для просмотра текущих заданий и формирования отчета о их выполнении.

Использование разработанного программного комплекса веб-ГИС, реализующего методику организации процесса мониторинга торговых и промышленных объектов, позволило менеджеру сократить затраты времени на ежедневное планирование выездных работ. Согласно проведенной оценке средние временные издержки на планирование графика работ были сокращены на 25% в день.

Полученные в результате апробации данные свидетельствуют о повышении эффективности планирования работ по мониторингу торговых и промышленных объектов при использовании предложенной методики организации процесса мониторинга. Разработанная методика может быть использована в дальнейшем в рамках других предметных областей, требующих ведения базы пространственно-атрибутивных данных территориально распределенных объектов.

Литература

1. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности [Электронный ресурс] / Федеральный закон Российской Федерации от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ. – Доступ из справочно-правовой системы «Консультант-Плюс». – Режим доступа: <http://www.consultant.ru/docu>

ment/cons_doc_LAW_78699/, свободный (дата обращения: 25.10.2017).

2. Свод правил СП 9.13130.9009 «Техника пожарная. Огнетушители. Требования к эксплуатации» [Электронный ресурс]. – Доступ из справочно-правовой системы КонсультантПлюс. – Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_91587/, свободный (дата обращения: 25.10.2017).

3. Мусаев В.К. Об анализе безопасности и технического состояния строительных объектов // Двойные технологии. – 2013. – № 2(63). – С. 26–28.

4. Кудж С.А. Геомониторинг как процесс познания // Перспективы науки и образования. – 2015. – № 1(13). – С. 24–29.

5. Герасименко Н.М. Повышение конкурентоспособности организаций розничной торговли на основе рационализации ассортимента товаров (на примере товаров предварительного выбора) / Н.М. Герасименко, Т.А. Торопова. – Хабаровск: РИЦ ХГАЭП, 2015. – 116 с.

6. Белоновский П.В. Автоматизация мониторинга обслуживания газораспределительных систем Оренбургской области / П.В. Белоновский, И.В. Влацкая // Вестник Оренб. гос. ун-та. – 2015. – № 4(179). – С. 172–176.

7. Ерунова М.Г. Геоинформационное обеспечение задач экологического мониторинга особо охраняемых территорий / М.Г. Ерунова, А.А. Гостева, О.Э. Якубайлик // Журнал Сибирского федерального университета. Сер.: техника и технологии. – 2008. – № 4(1). – С. 366–376.

8. Якубайлик О.Э. Геоинформационная интернет-система мониторинга состояния окружающей природной среды в зоне действия предприятий нефтегазовой отрасли // Вестник Сиб. гос. аэрокосмического ун-та им. акад. М.Ф. Решетнева. – 2010. – № 1. – С. 40–45.

9. Ехлаков Ю.П. Геоинформационные технологии мониторинга инженерных сетей / Ю.П. Ехлаков, Ю.Б. Гриценко, О.И. Жуковский. – Томск: ТУСУР, 2010. – 149 с.

10. Мониторинг загрязнений твердыми бытовыми отходами городской среды посредством информационно-телекоммуникационных технологий / В.В. Юшин, В.В. Зотов, И.О. Рыкунова, Е.А. Преликова // Изв. Юго-Западного гос. ун-та. Сер.: техника и технологии. – 2011. – № 1. – С. 87–94.

11. Гриценко Ю.Б. Интерфейс взаимодействия геоинформационной технологии ведения электронного генерального плана со сторонними программными системами / Ю.Б. Гриценко и др. // Доклады ТУСУРа. – 2013. – № 1(27). – С. 129–134.

Милихин Михаил Михайлович

Аспирант каф. автоматизации обработки информации (АОИ) ТУСУРа
Тел.: +7-999-619-38-90
Эл. почта: milikhin@gmail.com

Гриценко Юрий Борисович

Канд. техн. наук, доцент каф. АОИ ТУСУРа
Тел.: +7 (382-2) 90-01-80
Эл. почта: ubg@muma.tusur.ru

Шурыгин Юрий Алексеевич

Д-р техн. наук, профессор каф. компьютерных систем в управлении и проектировании ТУСУРа
Тел.: +7 (382-2) 51-05-30
Эл. почта: sya@tusur.ru

Milikhin M.M., Gritsenko Yu.B., Shurygin Yu.A.

Methodology to monitor commercial and industrial facilities using geoinformation technologies

The article contains an analysis of problems faced by companies providing the monitoring of commercial and industrial facilities. It is shown that due to the absence of a single platform for data collection and processing, taking into account the requirements of stakeholders, various software tools and information technologies are used during the monitoring process. Such domain specificity increases the fragmentation and duplication of data and makes difficult to provide shared access to the up-to-date data and analysis tools. Literature review was held in order to formulate the structure of the monitoring process. Authors than conclude that it is impossible to solve the identified problems using existing methods. Methodology to set up the monitoring of commercial and industrial facilities' is proposed that allows solving the revealed problems of geodata managing using web-oriented geographic information systems. The proposed methodology was tested during the field monitoring of commercial organizations and can be used to solve similar problems within different domains.

Keywords: monitoring of retail outlets; monitoring of industrial facilities; web-based geographic information systems; geodata.

УДК 004.738

Е.В. Саломатина

Топологическая модель информационно-управленческой сети

Исследования моделей трафика представляют одну из приоритетных задач в области телекоммуникаций. Происходящие процессы конвергенции не только предоставляют новые возможности для абонентов, но и влияют на подсистемы сети и способы их построения. Работа информационно-управленческих сетей (ИУС), относящихся к классу динамических сетей, основана на организации многоуровневого взаимодействия между множеством её элементов. В статье исследуются вопросы построения оптимальной топологии ИУС, позволяющей сократить трафик за счет управления информационными потоками.

Ключевые слова: динамические графы, информационно-управленческая сеть, тензорное исчисление.

doi: 10.21293/1818-0442-2017-20-4-87-91

Актуальность

Внедрение цифрового стандарта является общемировой тенденцией развития телекоммуникаций и открывает большие возможности для предоставления дополнительных инфокоммуникационных (ИК) услуг населению. Темпы, глубина и масштаб технологических изменений определяют появление новых принципов передачи, распределения и обработки информации. Цифровые алгоритмы расширяют спектр предоставляемых сервисов и услуг, предлагают аудио и видео высокого качества и одновременно снижают потребности в радиочастотном спектре. Процессы конвергенции сетей связи представляют принципиально новые возможности для абонента, вместе с тем изменяются подсистемы сети и способы их построения, экспоненциально возрастает сложность управления сетью, происходит реструктуризация трафика пользователей. Все это обостряет проблемы управления информационными потоками в сетях передачи данных. С одной стороны, улучшение качества обслуживания передаваемых данных требует повышения требований к задержкам передачи, надежности и отказоустойчивости при изменяющейся интенсивности потоков данных. С другой стороны, повышение экономических показателей работы операторов связи требует увеличения загрузки ресурсов сети. Разумный компромисс может быть найден путем построения рациональной топологии сети, учитывающей множественность требований.

Формальное представление структуры информационно-управленческой сети

При изучении сложных структурно-изменяющихся сетей различной природы и происхождения широко используется понятие динамических сетей (Dynamic networks). Любая сеть при наличии принципиальных отличий в структуре и поведении обладает свойствами, которые отражают специфику строения, характерную для всех сетей, – состоит из некоторого конечного числа узлов, соединенных между собой связями. Структура связей между узлами задаёт топологию сети. Динамические сети постоянно подвергаются изменениям в своей структуре или атрибутах. Топология современной сети не может быть строго фиксированной, более того, она

вынуждена претерпевать изменения в силу различных обстоятельств, например увеличения количества абонентов в сети. В [1] высказывается мнение о важности динамических процессов, происходящих в узлах и связях. Процессы эволюции структуры и динамики узлов и связей взаимосвязаны. Особенности топологии связей непосредственно влияют на коллективную динамику узлов, а совместное изменение состояний может привести к изменению структуры сети.

Динамический граф как модель динамической сети представляет собой последовательность «классических» графов, не имеющих параллельных ребер и петель, переход между которыми описывается различными теоретико-графовыми операциями [2, 3]. Возможные изменения включают в себя вставку и удаление вершин (объектов), вставку и удаление ребер (связей) и изменение атрибутов. Последовательный процесс перехода графа из одного состояния в другое в различные моменты времени описывается динамическим процессом. При этом объектом исследования в рассматриваемой динамической задаче служит не движение по графу, а изменение графа в целом. В работах [4–6] для таких объектов используется понятие «графодинамическая система».

К данному классу систем относятся информационно-управленческие сети (ИУС), работа которых основана на организации многоуровневого взаимодействия между множеством её элементов [7–10]. Современная ИУС – это сложная территориальная распределённая человеко-машинная система, состоящая из большого, но конечного множества элементов, включающая широкую номенклатуру инфокоммуникационных средств. В основе описания ИУС лежит $x(t)$ – граф, существующий в момент времени t [5], при этом закон изменения графа во времени может быть записан в форме некоторого рекуррентного процесса

$$x(x+1) = F(x(t)),$$

где F – некоторый оператор над графом, преобразующий граф, наблюдаемый в момент t , в граф, наблюдаемый в момент времени $t+1$.

В информационно-управляющих системах выделяется жесткая иерархия вершин, включающая центр управления $C_{\mu Sa}$, промежуточные уровни

управления и абонентские вершины АП_i, являющиеся объектами управления.

Для описания ИУС при помощи модели будем считать элементы ИУС (пункты сбора, трансляции, ретрансляции и приема информации) вершинами вводимого графа. Каналы передачи данных, используемые в исследуемой ИУС, будем отождествлять с ребрами графа. Поскольку рассматриваются не только полностью дуплексные, но и полудуплексные и симплексные каналы, то направление движения информации по ним будет описываться ориентацией ребер графа. Под преобразованием графа ИУС понимается изменение топологии графа как в плане связности вершин, так и в плане изменения метрики весов, приписанных ребрам графа.

Как на ребрах, так и на вершинах графа может быть введена одна или несколько метрик: пропускная способность канала, надежность передачи данных (измеряемую в допустимом количестве ошибок на фиксированный объем данных), а также временные задержки, возникающие при передаче сообщений по каналу. Введенную метрику для каналов, соединяющих элементы АП_i и АП_j, будем описывать числовым значением a_{ij} . В случае если две вершины не связаны непосредственно, значение этой величины устанавливается в 0. Совокупность весов ребер графа наложим на матрицу связности ориентированного графа. В результате получим новую матрицу связности с числовыми коэффициентами:

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix}. \quad (1)$$

При оптимизации структуры ИУС требуется найти оптимальную топологию ребер связности графа, при которой целевая функция оптимизации – общая стоимость каналов связи принимает глобальный экстремум при наложенных ограничениях: минимально допустимые значения пропускной способности путей от источника информации к абонентской вершине и максимально допустимое время задержки при пересылке данных.

Использование тензорного исчисления для построения оптимальной топологической модели информационно-управленческой сети

На множестве графов, моделирующих структуру ИУС, вводится метрика в виде матрицы весовых коэффициентов, характеризующих стоимость передачи информации от вершины АП_i к вершине АП_j. Обозначим эту матрицу через **S**. Для обозначения множества весовых коэффициентов, характеризующих пропускную способность канала передачи данных от вершины АП_i к вершине АП_j введем обозначение **P**. И, наконец, для обозначения максимально возможной задержки в передаче данных введем обозначение **D**. Все эти матрицы являются разреженными.

Кроме простой метрики, на графе вводится сложная метрика, являющаяся композицией всех

перечисленных значений с некоторыми весовыми коэффициентами:

$$f_1 \times \mathbf{S} + f_2 \times \mathbf{P} + f_3 \times \mathbf{D}. \quad (2)$$

Для преобразования структуры графа вводится оператор **F**, осуществляющий переход от графа первоначальной структуры к графу с новой структурой. При этом преобразование является инвариантным, если сохраняется достижимость для всех абонентских вершин графа. В этом случае задача оптимизации сводится к последовательному применению множества операторов инвариантного преобразования.

Обозначим вектор вершин АП_i тензорным объектом \mathbf{y}^α . Для описания дуг введем тензорный объект \mathbf{x}^β , каждый элемент которого характеризует информационную связь между i и j вершинами графа. Этот векторный объект имеет размерность, равную количеству существующих (непустых) дуг графа.

Будем задавать топологию сети матрицей соединений вершин, где

$$\mathbf{J}_j^i = \begin{cases} 1, \\ 0, \end{cases}$$

если из вершины i в вершину j есть прямая связь либо прямой связи нет.

Дополнительной к этой матрице будет матрица связности дуг и вершин графа. Эта матрица описывает соединение i дуги с j через вершину. Тензор второго ранга, описывающий связь вершин, будем обозначать \mathbf{J}^β . При этом

$$\mathbf{V}_j^i = \begin{cases} 1, \\ 1, \\ 0, \end{cases}$$

в случае если дуга i выходит из вершины j , или дуга i входит в вершину j , или связь между дугой и вершиной отсутствует соответственно. Эта матрица состоит из нулей, единиц и минус единиц и при этом слабо заполнена. Будем описывать этой матрицей тензор \mathbf{V}_β^α , задающий преобразования топологии ИУС.

Объем информации, приходящий в текущий момент времени в каждую вершину i , будем обозначать как векторный объект \mathbf{y}_α .

В тензорной модели ИУС при преобразованиях структуры сети инвариантными остаются количество вершин и потоки информации, входящие и выходящие из каждой вершины. Это условие записывается как

$$\sum_{i=1}^N f_i x_i = \text{const}, \quad (3)$$

где N равно количеству дуг, связанных с вершиной, причем для выходящих дуг $f_i = -1$, а для входящих $f_i = 1$.

В тензорной форме равенство (3) записывается как

$$\mathbf{V}_\beta^\alpha \mathbf{x}^\beta = \mathbf{y}_\alpha = \text{const} \quad (4)$$

и задает инвариантное условие для группы допустимых графодинамических преобразований ИУС.

Для описания функции преобразования ИУС введем тензор F_{α}^{γ} , который характеризует переход от одной топологической структуры ИУС B_{β}^{α} к другой структуре B_{β}^{α} :

$$B_{\beta}^{\gamma} = F_{\alpha}^{\gamma} B_{\beta}^{\alpha}. \quad (5)$$

При этом инвариантность условия (4) сохраняется. Количество дуг и соответственно размерность матрицы B могут изменяться. Класс структурных преобразований сети с указанным инвариантом обладает свойствами алгебраической группы.

Для сравнения различных вариантов конфигурации ИУС, относящихся к одному классу инвариантности, необходимо ввести целевую функцию. Кроме того, каждое ребро графа имеет числовые значения, характеризующие пропускную способность канала, его надежность, стоимость его создания и эксплуатации. Для каждого из этих наборов значений введем свой тензорный объект: Z_{α} – стоимость канала связи, выраженная в денежных единицах (включая стоимость эксплуатации и начальную стоимость, разделенную на срок эксплуатации); P_{α} – пропускная способность канала (выраженная в бит/с); D_{α} – максимально возможная задержка (выраженная в секундах) при передаче информации по каналу, включая все задержки в аппаратуре связи и в канале данных.

В тензорной форме функция (2) будет записана как линейная комбинация трех тензоров, характеризующих метрику канала, умноженная на тензор связанности, отражающий топологическую структуру сети:

$$G(B) = B_{\beta}^{\alpha} (f_1 Z_{\alpha} + f_2 P_{\alpha} + f_3 D_{\alpha}) x^{\beta}. \quad (6)$$

В функции (6) также участвует вектор x^{β} , отражающий текущий объем информации, поступающей абоненту AP_i . Для источников информации значение этого параметра имеет отрицательное значение. Такой показатель, как надежность канала, измеряемая в количестве ошибок на определенный объем данных, частично выражается через задержку, требуемую для повторной передачи данных или корректирующей информации.

Основной особенностью класса систем S_{α} типа ИУС является особое положение вершин типа $C_{\mu S_{\alpha}}$ (асимметрично относительно остальных вершин типа AP_i). Анализ любой сложной сети можно существенно упростить, проведя ее декомпозицию на подсети таким образом, чтобы в каждой подсети была только одна вершина типа $C_{\mu S_{\alpha}}$. Алгоритм такой декомпозиции прост и состоит в том, что для каждой вершины типа $C_{\mu S_{\alpha}}$ определяется множество AP_i , которое с ней связано. После этого данная подсеть выделяется в виде отдельного графа, в котором присутствует только один центр и все его абонентские пункты. Если один AP_i связан сразу с несколькими центрами, то эта вершина AP_i входит в несколько подсетей.

После проведения декомпозиции можно рассматривать простой класс сетей с единственным информационным центром. Все утверждения, доказанные для такого класса сетей, будут справедливы и для общей сети, поскольку результирующая сеть является линейной комбинацией подсетей.

Оптимальная топология ИУС – та, при которой все объекты ИУС оказываются в любой момент времени симметричными относительно любого центра $C_{\mu S_{\alpha}}$ и абонента AP_i (рис. 1).

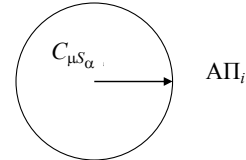


Рис. 1. Иллюстрация к оптимизации топологии ИУС

Произведем декомпозицию сети на подсети, каждая из которых имеет единственный центр. Обозначим каждую сеть как S_{α} , при этом результирующая сеть S будет объединением всех составляющих ее подсетей

$$S = S_1 \cup S_2 \cup \dots \cup S_{\alpha}. \quad (7)$$

Введем на каждой из подсетей метрику, определяющую расстояние между каждой из пар вершин в соответствии с (6). Подставим в (6) значения топологической матрицы для симметричного случая. Получим

$$B_1^{\alpha\beta} = \begin{pmatrix} -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & \dots \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{pmatrix}.$$

Раскроем выражение (6) в виде суммы

$$G(B_1) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M b_{ij} (f_1 s_i + f_2 p_i + f_3 d_i) = \sum_{i=2}^N (f_1 s_i + f_2 p_i + f_3 d_i) - (f_1 s_1 + f_2 p_1 + f_3 d_1).$$

Для любого другого случая выражение будет иметь вид

$$G(B_2) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M b_{ij} (f_1 s_i + f_2 p_i + f_3 d_i) = \sum_{i=1}^N b_{ij}^2 + \sum_{i=2}^N (f_1 s_i + f_2 p_i + f_3 d_i) + \sum_{j=1}^K (f_1 s_j + f_2 p_j + f_3 d_j).$$

В случае несимметричной конфигурации сети с одним информационным центром информация, предназначенная для i -й вершины, проходит не по одной дуге, а по пути, состоящему из последовательности дуг. Для дуги, входящей в несколько путей, составляющие элементы суммируются. Вычтем

значения целевой функции для симметричного случая из общего случая:

$$\begin{aligned} G(\mathbf{B}_2) - G(\mathbf{B}_1) = & \sum_{i=2}^N (f_1 s_i + f_2 p_i + f_3 d_i) - \\ & - (f_1 s_1 + f_2 p_1 + f_3 d_1) - \sum_{i=2}^L (f_1 s_i + f_2 p_i + f_3 d_i) - \\ & - \sum_{j=1}^K (f_1 s_j + f_2 p_j + f_3 d_j) = \sum_{i=2}^N (f_1 s_i + f_2 p_i + f_3 d_i) + \sum_{i=1}^{N-1} b_{ij}^2. \end{aligned}$$

Поскольку в итоговом выражении все составляющие положительны, следовательно, исходное выражение всегда будет больше нуля:

$$G(\mathbf{B}_2) - G(\mathbf{B}_1) > 0, \text{ тогда } G(\mathbf{B}_2) > G(\mathbf{B}_1).$$

Это значит, что значение целевой функции на любой несимметричной S_α всегда больше значения целевой функции на симметричной S_α и, следовательно, $G(\mathbf{B}_1) = \min$. Поэтому значение целевой функции на симметричной S_α всегда минимально, следовательно, построенная таким образом сеть оптимальна в смысле комплексного критерия затрат, задержек и пропускной способности каналов.

Реализация утверждения способствует созданию возможностей к оптимизации объема передаваемой информации в сети S_α .

Поскольку одной из компонент оптимизации ИУС является объем передаваемой информации, а зависимость от различных составляющих является линейной композицией, можно провести линейную декомпозицию целевой функции по составляющим компонентам (стоимостному, временному и объемному). В силу свойства неотрицательности коэффициентов f_i можно утверждать, что полученная в результате декомпозиции объемная компонента будет монотонно убывать при преобразовании сети от менее централизованной к более централизованной и симметричной относительно центра.

В соответствии с принципом декомпозиции сетей ИУС сеть ИУС легко разбивается на подсети с единственным информационным центром. Каждая из независимых подсетей может быть как оптимальной, так и неоптимальной. Но если все подсети оптимальны, то и результирующая сеть также оптимальна, что непосредственно следует из линейности процедуры объединения подсетей.

Выводы

В информационно-управляющих системах (ИУС) выделяется жесткая иерархия вершин, включающая центр управления $C_{\mu S_\alpha}$, промежуточные уровни управления и абонентские вершины $АП_i$, являющиеся объектами управления.

Анализ сети значительно упрощает декомпозиция, где подсеть выделяется в виде отдельного графа, в котором присутствуют только один центр типа $C_{\mu S_\alpha}$ и множество абонентских пунктов $АП_i$, которые с ним связаны.

Поскольку результирующая сеть является линейной комбинацией подсетей, после проведения декомпозиции все утверждения, доказанные для

класса сетей с единственным информационным центром, будут справедливы и для общей сети.

В оптимальной топологии ИУС все ее объекты оказываются в любой момент времени симметричными относительно любого центра $C_{\mu S_\alpha}$ и абонента $АП_i$.

Любое продвижение S_α в сторону оптимальной топологии сопровождается уменьшением объема передаваемой в ИУС информации.

Сети ИУС могут иметь отдельные участки в сети, где реализуются условия оптимальной топологии.

В ИУС имеется предельное значение отрезка времени, в течение которого абонент $АП_i$ может находиться вне какой-либо, хотя бы одной ИУС.

Благодарности

Автор благодарит академика Национальной академии наук Республики Армения, заслуженного работника связи РФ, д.т.н. В.К. Сарьяна за ценные обсуждения и полезные советы по теме работы.

Литература

1. Масленников О.В. Адаптивные динамические сети / О.В. Масленников, В.И. Некоркин // Успехи физических наук. – 2017. – Т. 187, № 7. – С. 745–756.
2. Оре О. Теория графов. – 2-е изд. – М.: Наука, 1980. – 336 с.
3. Кочкаров А.А. Структурная динамика: свойства и количественные характеристики предфрактальных графов. – М.: Вега-Инфо, 2012. – 120 с.
4. Динамический подход к анализу структур, описываемых графами (основы графодинамики). I / М.А. Айзерман, Л.А. Гусев, С.В. Петров, И.М. Смирнова // Автоматика и телемеханика. – 1977. – № 7. – С. 136–151.
5. Тененбаум Л.А. Исследование одного класса графодинамических систем // Автоматика и телемеханика. – 1978. – № 10. – С. 153–173.
6. Затуливетер Ю.С. Графодинамические системы с сетевым управлением в математически однородном поле компьютерной информации / Ю.С. Затуливетер, Е.А. Фищенко // Управление большими системами. – М.: ИПУ РАН, 2010. – № 30.1. – С. 567–604.
7. Сарьян В.К. Массовые информационно-управленческие сети – основа инфокоммуникационной среды будущего // IV Междунар. отраслевая науч.-техн. конф. «Технологии информационного общества»: Программа научно-технических секций. – М.: МТУСИ, 2010. – С. 6.
8. Сарьян В.К. О влиянии типовых информационных процессов на эволюцию информационно-управленческих сетей / В.К. Сарьян, Д.В. Дубнов // Труды НИИР. – 2010. – № 3. – С. 4–10.
9. Беляков К.О. Перспективы использования защищенных информационно-управленческих сетей для информатизации образования / К.О. Беляков, Р.В. Мещеряков // Электронные средства и системы управления: докл. междунауч.-практ. конф. (Томск, 8–10 нояб. 2012 г.). — Томск: В-Спектр, 2012. – Ч. 2. – С. 32–34.
10. Особенности реализации социальных технологий средствами современных инфокоммуникационных систем / В.К. Сарьян, Е.В. Саломатина, А.П. Назаренко, Н.А. Сущенко // Труды НИИР. – 2014. – № 3. – С. 33–37.

Саломатина Елена Васильевна

Аспирантка базовой каф. электромагнитной
совместимости и управления радиочастотным спектром
Московского технического университета
связи и информатики (МТУСИ) при ФГУП НИИР
Тел.: +3-737-782-61-81
Эл. почта: salolew@spsu.ru

Salomatina E.V.

Topological model of information control network

The studies of traffic patterns represent one of the priority tasks in the field of telecommunications. The occurring convergence processes not only provide new opportunities for subscribers, but also affect the network subsystems and the ways of their construction. The work of information control networks (ICN), belonging to the class of dynamic networks, is based on the organization of a multilevel interaction between the set of its elements. The article explores the issues of constructing the optimal topology of ICN, which allows to reduce traffic due to the management of information flows.

Keywords: dynamic graphs, information control networking, tensor calculus.

УДК 004.65

И.Г. Боровской, Е.А. Шельмина

Сравнительный анализ настольных и клиент-серверных СУБД

Приведен сравнительный анализ настольных и клиент-серверных СУБД, сформированы критерии выбора СУБД для решения различных задач. Кроме того, проведено тестирование производительности рассматриваемых СУБД. Для проведения указанного анализа выбраны наиболее популярные настольные СУБД, такие как Microsoft Access, Paradox, а также клиент-серверные СУБД: Firebird, MySQL и Oracle.

Ключевые слова: система управления базами данных, производительность СУБД, транзакции, триггеры, хранимые процедуры, защита данных, Firebird, MySQL, Oracle, MS SQL Server.

doi: 10.21293/1818-0442-2017-20-4-92-94

В настоящее время жизнь человека настолько насыщена различного рода информацией, что для ее обработки требуется создание огромного количества хранилищ информации различного назначения.

Кроме того, в последние годы наблюдается определенное усложнение структуры различных данных. Простые типы информации, представляемые в виде текстовых строк и чисел, не потеряв своей важности, дополняются сегодня большим количеством документов, которые используют средства мультимедиа, образов графики, процедурных или активных данных и большим числом других существенно усложненных форм информации. По этой причине появился ряд весьма изощренных систем управления базами данных, обеспечивающих новые коллекции данных и умеющих реализовать достоинства современных аппаратных технологий.

В данной работе приведен сравнительный анализ настольных и клиент-серверных СУБД, который может облегчить выбор необходимой СУБД разработчикам баз данных.

Обзор современных настольных СУБД

На сегодняшний день известно более двух десятков форматов данных настольных СУБД, однако наиболее популярными и используемыми являются Paradox и Microsoft Access. Настольные СУБД чаще всего используются в государственных учреждениях, сферах образования, сферах обслуживания, малом и среднем бизнесе. Специфика возникающих в этих областях задач заключается в том, что объемы данных не являются катастрофическими, частота обновлений не бывает слишком большой, территориально организация обычно расположена в одном небольшом здании, количество пользователей колеблется от одного до десяти человек. В подобных условиях использование настольных СУБД для управления информационными системами является вполне оправданным и с успехом применяется [1].

Так, основными преимуществами СУБД Microsoft Access являются высокая устойчивость данных, простота в освоении, возможность использования непрофессиональными программистами, способность создания отчетов из баз данных различных форматов.

Основными преимуществами СУБД Paradox являются простота в администрировании и освоении, наличие встроенных средств администрирования с

GUI-интерфейсом, наличие собственных утилит для отладки запросов.

Недостатками СУБД Paradox являются отсутствие возможности удаленного и web-администрирования, а также отсутствие шифрования данных.

Обзор клиент-серверных СУБД

Во многих современных СУБД реализуется архитектура клиент-сервер, в которой один процесс (клиент) посылает запрос для выполнения другому процессу (серверу) [2]. Наиболее популярными клиент-серверными СУБД являются Firebird, MS SQL Server, MySQL, Oracle.

Firebird – компактная, кроссплатформенная, свободная система управления базами данных. Firebird полностью поддерживает стандарты ANSI в синтаксисе языка SQL и может работать под управлением многих операционных систем. Среди достоинств этой системы – использование очень развитого языка для хранимых процедур и триггеров. Firebird полностью бесплатна, она не требует ни регистрации, ни оплаты за поддержку [3].

Но данная СУБД имеет и некоторые недостатки, например, отсутствие кэша результатов запросов и полнотекстовых индексов, значительное падение производительности при росте внутренней фрагментации базы данных [3].

MySQL – свободная система управления базами данных. Достоинства MySQL: работает на различных платформах, имеет поддержку нескольких одновременных запросов, содержит записи фиксированной и переменной длины, имеет гибкую систему привилегий и паролей, обладает легкостью управления таблицей, включая добавление и удаление ключей и полей [4].

Недостатки и ограничения MySQL: не реализована поддержка транзакций, проблемы с надежностью – из-за некоторых способов обработки данных MySQL (связи, транзакции, аудиты) иногда уступает другим СУБД по надежности [4].

Современная СУБД Oracle – это мощный программный комплекс, позволяющий создавать приложения любой степени сложности. Ядром этого комплекса является база данных, хранящая информацию, количество которой за счет предоставляемых средств масштабирования практически безгранично [5].

Выбор и тестирование СУБД

Если при выборе той или иной СУБД исходить только из достоинств и недостатков этих СУБД, то такой выбор может оказаться субъективным. Поэтому было проведено тестирование на производительность наиболее популярных СУБД.

В ходе тестирования настольных и клиент-серверных СУБД необходимо:

- проверить работоспособность СУБД при выполнении основных операций, таких как запись, чтение, обновление, удаление данных;
- проверить работоспособность СУБД при выполнении основных операций при увеличении количества записей со 100 до 100000 (для клиент-серверных до 1 млн);
- сравнить рассматриваемые СУБД при выполнении основных операций по производительности и по влиянию роста количества записей на производительность.

Для тестирования СУБД было разработано Java-приложение, в котором все базы данных настроены на единого пользователя и единый пароль, а также единое имя базы данных. Приложение обеспечивает подключение к СУБД через API-интерфейс JDBC (Java Database Connectivity).

Тестирование настольных СУБД

Тестирование СУБД проводилось на основе БД, в которой все данные генерировались случайным образом. Данная БД состоит из следующих полей: имя, пол, возраст, зарплата, характеристика, специальность, идентификатор рабочего места.

Время генерации БД не входит в общее время выполнения основных команд, таких как запись, чтение, обновление, удаление данных. Считается только время на выполнение команды.

Результаты тестирования настольных СУБД представлены в табл. 1.

Таблица 1
Результаты тестирования настольных СУБД

Microsoft Access				
Количество записей	100	1000	10000	100000
Запись, мс	734	7892	131939	1596871
Чтение, мс	0	16	31	125
Обновление, мс	905	19755	1559987	10900000
Удаление, мс	63	406	17501	22669
Paradox				
Количество записей	100	1000	10000	100000
Запись, мс	708	7866	131910	1596842
Чтение, мс	0	0	17	96
Обновление, мс	879	19729	1559958	10899971
Удаление, мс	37	377	17475	22640

Результаты тестирования показали, что СУБД Paradox показывает более высокую производительность в отличие от СУБД Microsoft Access при выполнении операций записи, чтения, обновления и удаления записей. Но СУБД Paradox значительно проигрывает в мощности языка программирования и интегрированности с другими продуктами.

Оптимально использовать СУБД Paradox для небольших проектов персонального пользования. Для многопользовательских проектов, где требуется высокий уровень защиты данных, а также используются большие массивы информации, СУБД Paradox применять не рекомендуется.

СУБД Microsoft Access также рекомендовано использовать для решения небольших задач, при создании небольших баз данных. Любая задача может быть реализована на Microsoft Access обычным пользователем, так как Microsoft Access предлагает большое количество мастеров, которые выполняют основную работу за пользователя при работе с данными и разработке приложений, помогают избежать рутинных действий и облегчают работу пользователю. Недостатками данной СУБД являются быстрый рост размеров БД за счет создания большого количества черновых записей.

Тестирование клиент-серверных СУБД

При тестировании клиент-серверных СУБД использовалась та же база данных, что и при тестировании настольных СУБД. Результаты тестирования клиент-серверных СУБД представлены в табл. 2.

Таблица 2
Результаты тестирования клиент-серверных СУБД

Firebird					
Количество записей	100	1000	10000	100000	1000000
Запись, мс	78	720	6544	63559	634949
Чтение, мс	0	0	0	0	0
Обновление, мс	78	702	6156	62820	623093
Удаление, мс	0	0	140	1094	10891
MySQL					
Количество записей	100	1000	10000	100000	1000000
Запись, мс	46	515	4590	45179	454907
Чтение, мс	0	0	31	406	5766
Обновление, мс	16	438	4185	43429	434049
Удаление, мс	0	0	47	375	5047
Oracle					
Количество записей	100	1000	10000	100000	1000000
Запись, мс	47	406	3046	31170	302071
Чтение, мс	0	0	0	0	0
Обновление, мс	63	362	9475	788632	7800000
Удаление, мс	0	31	125	1797	30924

Результаты тестирования клиент-серверных СУБД [7] показали, что при увеличении количества записей со 100 до 1 млн СУБД Oracle показала значительно более высокую производительность в отличие от MySQL и Firebird.

СУБД Oracle обладает высочайшей надежностью, возможностью разбиения крупных баз данных на разделы, что дает возможность эффективно управлять гигантскими гигабайтными базами. Имеет эффективные методы максимального повышения скорости обработки запросов, широкий спектр средств разработки, мониторинга и администрирования. В Oracle реализуются лучшие на сегодняшний день средства для объектно-ориентированного конструирования баз данных, в том числе табличные структуры, допускающие наследование свойств и методов других табличных объектов БД, что позволяет избежать ошибок при построении БД и облег-

чает их обслуживание. Однако Oracle наложила ограничения на свой бесплатный продукт, поэтому версия Oracle Database 11 g Express Edition, может работать только с 1 ядром, 1 Гб оперативной памяти и хранить данные не более 11 Гб. Этого вполне достаточно для одновременной работы с базой данных сотрудников малого предприятия либо сотрудников отдела крупной компании.

MySQL является решением для малых и средних приложений. Обычно MySQL используется в качестве сервера, к которому обращаются локальные или удаленные клиенты, однако в дистрибутив входит библиотека внутреннего сервера, позволяющая включать MySQL в автономные программы. Если необходимо создать web-приложение, MySQL – идеальное решение, быстро и качественно работающее на сетевых серверах.

СУБД Firebird [6] является одной из самых популярных в мире бесплатных систем управления базами данных с открытым исходным кодом. СУБД Firebird поддерживает большие базы данных. Базы данных могут быть расположены в нескольких файлах, предельный размер которых зависит от операционной системы. И, как в любой СУБД, на производительность Firebird влияют объем памяти и скорость работы дисковой подсистемы. Рекомендации для выбора аппаратного обеспечения зависят от требования к системе, прогнозируемого размера базы данных, количества пользователей и т.д.

Заключение

В представляемой работе был проведен сравнительный анализ возможностей современных СУБД на основе тестирования их производительности при выполнении различных операций. В результате этого тестирования СУБД Oracle показала значительно более высокую производительность в отличие от MySQL и Firebird. На основе полученных результатов были сформулированы наиболее перспективные направления работы для каждой СУБД.

Литература

1. Избачков Ю.С. Информационные системы: учебник для вузов / Ю.С. Избачков, В.Н. Петров. – СПб.: Питер, 2006. – 656 с.
2. Введение в базы данных: Архитектура клиент-сервер [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.mstu.edu.ru/study/materisls/zelenkov/ch_7_1.html, свободный (дата обращения: 25.09.2017).
3. Федоров А.Н. Введение в базы данных. – Ч. 2: Настольные СУБД / А.Н. Федоров, Н.С. Елманова // Компьютер-пресс. – 2000. – № 4. – С. 123–127.
4. Шварц Б.А. MySQL. Оптимизация производительности / Б.А. Шварц, П.Н. Зайцев, В.Т. Ткаченко. – М.: Наука, 2010. – 412 с.
5. Джеймс П. Введение в Oracle / П. Джеймс, П. Джеральд; пер. с англ. А.В. Назаренко; под ред. Л.Д. Гамзикова. – М.: Вильямс, 2006. – 704 с.
6. Документация по СУБД Firebird [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.firebirdsql.org/manual/ru/firebird-database-documentation-ru.html>, свободный (дата обращения: 27.09.2017).
7. Трофимов В.В. Синхронизация списков данных в клиент-серверных системах / В.В. Трофимов, Д.В. Завьялов // Изв. Волгогр. гос. техн. ун-та. Сер.: Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах. – 2015. – № 6 (163). – С. 87–90.
8. Документация по СУБД Firebird [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.firebirdsql.org/manual/ru/firebird-database-documentation-ru.html>, свободный (дата обращения: 27.09.2017).
9. Авдзейко В.И. Прогнозирование: формирование специализированных баз данных и построение временных рядов патентов / В.И. Авдзейко и др. // Доклады ТУСУРа. – 2015. – № 4(38). – С. 183–188.

Боровской Игорь Георгиевич

Д-р физ.-мат. наук, профессор, зав. каф. экономической математики, информатики и статистики ТУСУРа
Тел.: +7 (382-2) 90-01-85, внутр. 2819
Эл. почта: igdoca@mail.ru

Шельмина Елена Александровна

Канд. физ.-мат. наук, доцент каф. экономической математики, информатики и статистики ТУСУРа
Тел.: +7-913-840-69-67
Эл. почта: eashelmina@mail.ru

Borovskoy I.G., Shelmina E.A.

Comparative analysis of desktop and client-server databases

In this paper, a comparative analysis of desktop and client-server DBMS is made, criteria and practical recommendations are formed when choosing a DBMS for solving various problems. In addition, we tested the performance of the DBMS in question. The most popular desktop DBMS, such as Microsoft Access, Paradox, as well as client-server DBMS: Firebird, MySQL and Oracle, are selected for this analysis. As a result, practical recommendations are offered to developers, who find it difficult to choose a DBMS for the implementation of their task.

Keywords: database management system, DBMS performance, transactions, triggers, stored procedures, data protection, Firebird, MySQL, Oracle, MS SQL Server.

УДК 62.533.65

Т.А. Емельянова, В.И. Гончаров, Ю.Н. Дементьев, И.А. Тутов

Синтез двухконтурной системы управления химическим реактором численным методом с привлечением регуляризации

Представлена математическая модель химического реактора для создания термостойкого пластика. Проведен синтез регуляторов системы управления температурой многоконтурной системы автоматического управления на основе вещественного интерполяционного метода. Представлены результаты синтеза регуляторов многоконтурной системы.

Ключевые слова: химический реактор, термостойкий пластик, температура, двухконтурная система автоматического управления, вещественный интерполяционный метод.

doi: 10.21293/1818-0442-2017-20-4-95-99

Технология создания термостойкого пластика предусматривает получение исходного продукта в химическом реакторе, показанном на рис. 1 [1]. Он состоит из двух ёмкостей, помещённых друг в друга. В первую из них загружаются исходные продукты для химической реакции – 1, другая служит водяной рубашкой – 2, которая используется для стабилизации температуры содержимого рабочей камеры. В рубашку поступает холодная и горячая вода, ее расход регулируется соответствующими устройствами – 3. По регламенту температура в рабочей камере должна поддерживаться в жестких пределах. Химическая реакция протекает с выделением тепла. С позиций управления оно является источником возмущения для системы стабилизации температуры [2].

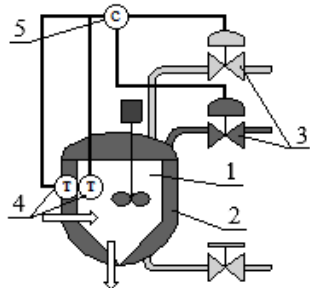


Рис. 1. Схема технологической установки

Будем рассматривать основную часть задачи управления технологическим процессом – управление температурой в рабочей емкости. Запуск системы начинается с загрузки ингредиентов в рабочую емкость, что в последующем приводит к химической реакции с выделением тепла, которое необходимо для разложения исходных веществ. Установлено, что оптимальная температура содержимого в рабочей емкости должно быть около 73 °С. Отклонение от этого значения должны быть сравнительно малым из-за особенностей процесса. В частности, даже кратковременное превышение заданного значения температуры на 7 °С может привести к затвердеванию смеси, что приводит к остановке процесса и значительным экономическим потерям. Вследствие этого перерегулирование в системе должно быть не более 14,5%. В связи с этим целесообразно не допускать такой большой величины перерегулирования.

Предварительные замечания

Анализ технологического процесса показал, что для управления температурой в системе необходимо иметь два контура управления, один – по температуре содержимого рабочей камеры, второй – по температуре водяной рубашки. Известно, что регулирующие клапаны обладают существенными нелинейностями [3]. Математическое описание клапанов представляет самостоятельную задачу и выходит за рамки данной статьи. Для исследовательских целей было принято допущение: регулирующие клапаны представить масштабируемыми передаточными звеньями. Математическая модель такой системы автоматического управления (САУ) получена в [4]. Ее структурная схема представлена на рис. 2.

Обозначения параметров и известные значения некоторых из них: $T=4,3$ с, $k_1=1,2$ и $k_2=5,9$, $m_{p,к}=0,23$ кг, $m_p=0,61$ кг. Значения постоянной времени апериодического звена нагревателя T , коэффициентов теплопередачи стенок k_1 и k_2 получены экспериментально. Масса жидкости в рабочей камере $m_{p,к}$ и масса воды в водяной рубашке m_p были измерены.

Для выполнения одного из основных требований, предъявляемых к САУ – ограничению перерегулирования по температуре в рабочей камере, необходимо изменять температуру воды в рубашке так, чтобы перерегулирование не выходило за заданный предел. Для достижения цели используется каскадный регулятор, в состав которого входят два ПИ-регулятора. Первый формирует управляющее воздействие для второго регулятора в соответствии с разницей между уставкой и измеренным значением температуры в рабочей камере реактора. Второй формирует управляющее воздействие для исполнительного механизма, который изменяет температуру воды в рубашке в соответствии с разницей между управляющим воздействием первого регулятора и измеренным значением температуры в водяной рубашке.

Выбор закона регулирования представляет самостоятельную и непростую задачу. Она дополнительно осложняется наличием шумов в сигналах, поступающих с датчиков температуры. Прямой путь

фильтрации помех в данных условиях проблематичен, так как возникает задержка сигналов обратной связи, негативно влияющая на свойства системы управления. В то же время необходимо, чтобы регулятор формировал управляющие воздействия, максимально точно соответствуя мгновенным значениям сигналов датчиков обратной связи. Эксперименты и расчеты показали, что применение каскадного управления на основе ПИ-регуляторов рационально в том смысле, что они отвечают компромиссным требованиям.

По указанным причинам повышение точности работы САУ целесообразно осуществлять на этапе синтеза регуляторов, максимально реализуя потенциальные возможности коррекции свойств системы. Эти возможности связаны не столько с выбором метода и тщательностью расчетов, сколько с новым подходом к синтезу САУ, которые имеют несколько контуров управления.

Синтез регуляторов системы управления температурой

Традиционный подход к синтезу многоконтурных систем, в том числе двухконтурных, основан на последовательном расчете контуров, начиная с внутреннего. Несмотря на его простоту в инженерном плане, он не позволяет использовать все потенциальные возможности регуляторов, так как распределение желаемых свойств по контурам осуществляется в значительной степени произвольно [5]. Последнее является дополнительным источником погрешности (кроме этапа собственно синтеза), что при расчете рассматриваемой системы крайне нежелательно. Для устранения этого недостатка в работе решено использовать подход к синтезу двухконтурной САУ на основе вещественного интерполяцион-

ного метода (ВИМ) [6]. Он позволяет решить уравнение синтеза, в которое входят передаточная функция желаемой САУ, получаемая, например, по заданным показателям качества, модель объекта, а также неизвестные передаточные функции регуляторов. Такой подход не требует декомпозиции желаемых свойств САУ по контурам, поэтому не имеет указанного ранее источника дополнительной погрешности и потому потенциально обладает большей точностью.

Известно [6], что применение ВИМ для решения уравнений синтеза многоконтурных САУ возможно, но ограничивается всего лишь двумя-тремя неизвестными коэффициентами. Увеличение числа неизвестных приводит к ухудшению обусловленности. В рассматриваемой задаче имеются два регулятора с общим числом неизвестных коэффициентов четыре. Можно предполагать, что решение едва ли будет найдено без принятия специальных мер, улучшающих обусловленность уравнения синтеза. Такой мерой является привлечение какого-либо метода регуляризации [7, 8].

Структурная схема синтезируемой системы, адаптированная для синтеза регуляторов таким методом, представлена на рис. 3 в виде двухконтурной системы.

По этой схеме получим передаточные функции объектов управления внутреннего и внешнего контуров управления $W_{OY1}(p)$, $W_{OY2}(p)$ и $W_{OY3}(p)$ соответственно:

$$W_{OY1}(p) = \frac{1423,5}{4,3p + 1}; \tag{1}$$

$$W_{OY2}(p) = \frac{5699,4p}{2474892p^2 + 21981,48p + 7,08}; \tag{2}$$

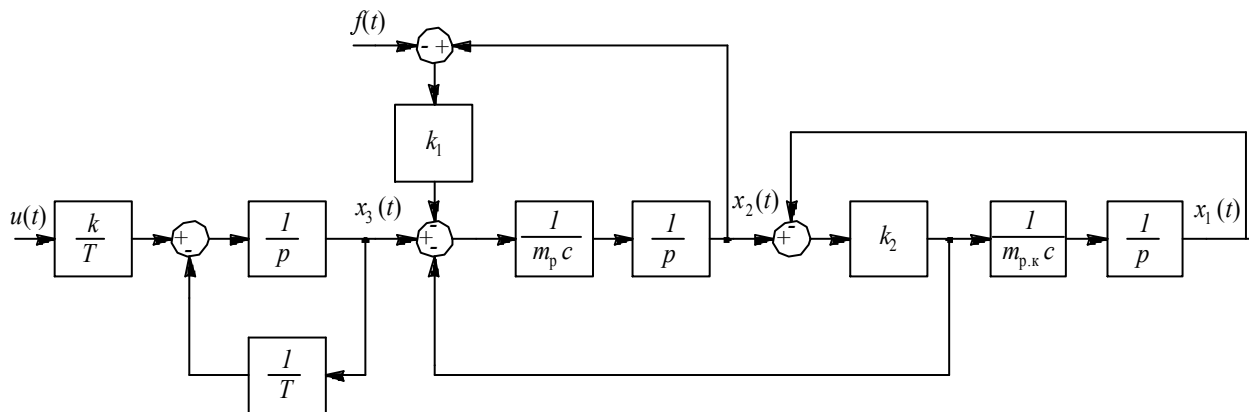


Рис. 2. Структурная схема химического реактора

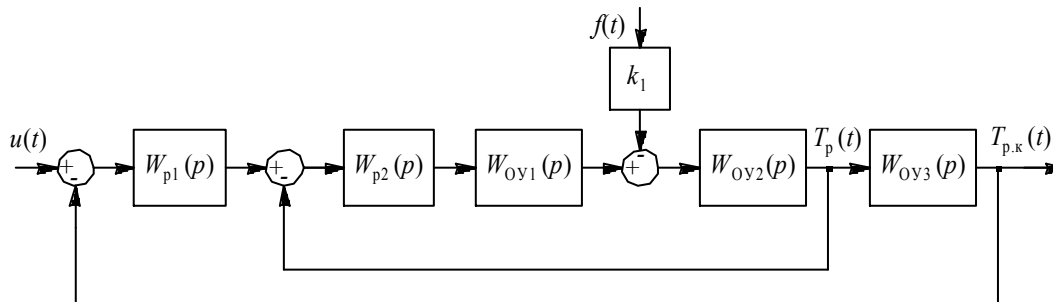


Рис. 3. Структурная схема системы управления

$$W_{Oy3}(p) = \frac{1}{966p}. \quad (3)$$

Передаточные функции регуляторов по условиям задачи имеют вид

$$W_{p1}(p) = K_1 + K_2 \frac{1}{p}; \quad W_{p2}(p) = K_3 + K_4 \frac{1}{p}. \quad (4)$$

Имея представленные данные, составим уравнение синтеза

$$\frac{1}{p} \left(\frac{W_3^*(p)}{W_{Oy3}(p)W_{Oy2}(p)W_{p2}(p)W_{Oy1}(p)W_{p1}(p)} + W_3^*(p) + \frac{W_3^*(p)}{W_{Oy3}(p)W_{p1}(p)} - 1 \right) = \frac{C \cdot k_1}{W_{p2}(p)W_{Oy1}(p)W_{p1}(p)},$$

где $W_3^*(p)$ – передаточная функция желаемой замкнутой системы; C – ненулевые начальные условия по температуре окружающей среды, °С.

После преобразования получаем:

$$\frac{1}{p} \left(W_3^*(p) \left/ \left(\frac{1}{966p} \cdot \frac{5699,4p}{2474892p^2 + 2198,48p + 7,08} \times \frac{K_3p + K_4}{p} \cdot \frac{1423,5}{4,3p + 1} \cdot \frac{K_1p + K_2}{p} \right) + \frac{W_3^*(p)}{\frac{1}{966p} \cdot \frac{K_1p + K_2}{p}} + W_3^*(p) - 1 \right) = \frac{C \cdot 1,2}{\frac{K_3p + K_4}{p} \cdot \frac{1423,5}{4,3p + 1} \cdot \frac{K_1p + K_2}{p}}.$$

Таким образом, имеем уравнение с четырьмя неизвестными параметрами K_1, K_2, K_3, K_4 . В соответствии с методикой ВИМ необходимо определить передаточную функцию желаемой системы, выбрать четыре узла интерполирования, определить численные характеристики объекта управления и желаемой передаточной функции. Затем необходимо найти численные характеристики регуляторов и на их основе составить систему из четырех уравнений. Воспользуемся этой последовательностью.

Начнем с получения передаточной функции желаемой системы. Не останавливаясь подробно на этой части задачи, приведем конечный результат, полученный по методу Коновалова–Оурурка [9] для желаемого времени переходного процесса 1344 с и перерегулирования $\sigma \leq 1\%$.

$$W_3^*(p) = \frac{153p + 1}{34240p^2 + 306p + 1}.$$

В конечном итоге уравнение синтеза принимает вид

$$\frac{1}{p} \left(\frac{153p + 1}{34240p^2 + 306p + 1} \left/ \left(\frac{1}{966p} \times \frac{5699,4p}{2474892p^2 + 2198,48p + 7,08} \times \frac{K_3p + K_4}{p} \times \frac{1423,5}{4,3p + 1} \times \frac{K_1p + K_2}{p} \right) + \frac{153p + 1}{34240p^2 + 306p + 1} + \frac{1}{966p} \times \frac{K_1p + K_2}{p} + W_3^*(p) - 1 \right) = \frac{C \cdot 1,2}{\frac{K_3p + K_4}{p} \cdot \frac{1423,5}{4,3p + 1} \cdot \frac{K_1p + K_2}{p}}.$$

$$+ \frac{153p + 1}{34240p^2 + 306p + 1} - 1 \Big) = \frac{C \cdot 1,2}{\frac{K_3p + K_4}{p} \cdot \frac{1423,5}{4,3p + 1} \cdot \frac{K_1p + K_2}{p}}.$$

Обратим внимание на его важную особенность, которая создает принципиальные препятствия – неизвестные параметры входят в уравнение нелинейно. В результате перехода к системе уравнений по технологии ВИМ и ее решения методом Ньютона работоспособное решение не было получено. Наиболее вероятная причина – некорректность постановки задачи, что требует регуляризации при ее решении. На это указывают неудачные попытки получения подходящего решения при изменениях некоторых исходных данных, в частности начальных приближений в методе Ньютона. Для проверки предположения определим показатель обусловленности матрицы системы уравнений – число обусловленности по норме L2. Получили: $\text{cond2}(R(K_1, K_2, K_3, K_4)) = 5,483 \cdot 10^{13}$. Предположение оказалось верным, так как обусловленность оказалась недопустимо плохой.

В этих условиях необходимо перейти к другой системе уравнений, которая близка исходной, но не имеет столь существенного недостатка. Такой переход осуществляется с помощью инструментов регуляризации. Воспользуемся этой возможностью, привлекая метод Тихонова [10].

Синтез САУ с привлечением регуляризации по Тихонову

Примем величину параметра регуляризации λ , основываясь на имеющемся опыте и известных рекомендациях, равным 10^{-3} . Не приводя регуляризованное уравнение, которое в развернутой форме оказывается объемным, укажем главное: число обусловленности снизилось до величины $5,346 \cdot 10^9$, при которой вычислительные погрешности не будут играть решающей роли даже при стандартной разрядной сетке персональных компьютеров.

Для поиска результата, наиболее близкого к желаемому, привлечем инструментальную переменную ВИМ δ_1 и, изменяя ее, получим решение: $K_1 = 2,244$, $K_2 = 0,021$, $K_3 = 2,005$, $K_4 = 0,342$. Для сравнения полученного результата с желаемыми показателями найдем переходную характеристику. Она показана на рис. 4.

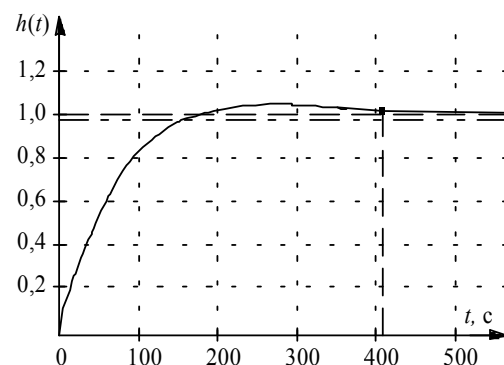


Рис. 4. График переходной характеристики САУ

Видно, что синтезированная система соответствует предъявляемым требованиям: время переходного процесса составляет 410,0 с, что значительно меньше заданного значения 1344 с; перерегулирование $\sigma \leq 4,7\%$, что также удовлетворяет условию $\sigma \leq 14,5\%$.

Заключение

В представленной работе можно выделить два аспекта. Первый относится к практической стороне задачи. Известно, что в общем случае системы с числом контуров более одного обладают лучшими динамическими показателями. Однако хорошо разработанные методы синтеза распространяются лишь на одноконтурные САУ, в то время как на практике обычно используются двух-, трехконтурные системы. В случае расчета таких систем возникают принципиальные трудности. В работе показана возможность расчета двухконтурной системы, не прибегая к традиционному способу последовательной настройки по контурам, для которого характерно появление дополнительной погрешности. Второй аспект работы, на который хотелось бы обратить внимание, относится к ее научной стороне. Уже отмечалось, что переход к расчету многоконтурных систем влечет за собой изменения в структуре уравнения синтеза САУ – оно переходит из класса линейных относительно коэффициентов корректирующих средств в класс нелинейных. Эти изменения приводят к принципиальным трудностям. Во-первых, это известные трудности решения нелинейных уравнений. Во-вторых, получаемые на этой основе системы уравнений не только нелинейные, но и плохо обусловленные. И в этих непростых условиях находится возможность получения решения численным методом, привлекая ВИМ.

В то же время нужно признать, что ограничения используемого пути синтеза многоконтурных систем существуют и очень существенны. Выделим два главных препятствия. Первое связано с использованием метода Ньютона, который требует знания хороших начальных приближений, что в общем случае проблематично. Отсюда вытекает задача разработки нового подхода к решению систем нелинейных уравнений, не имеющего столь жестких условий. Основания для поиска имеются. Они связаны со специфическими особенностями систем уравнений, которые могут улучшить алгоритм и снизить требования по точности начальных приближений. Второе препятствие определено числом искомых коэффициентов: их увеличение до пяти-шести часто делает задачу неразрешимой. Эти две задачи остаются открытыми для рассмотрения.

Литература

1. Belyaev A.S. Analysis of noisy signal restoration quality with exponential moving average filter [Electronic resources] / A.S. Belyaev, I.A. Tutov, D.V. Butuzov // Control and Communications (SIBCON): Proceedings of the XII International Siberian Conference, Moscow, May 12–14, 2016. – [S. I.]: IEEE, 2016. – М. – 4 р. – Title screen [Электронный

ресурс]. – Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.1109/SIBCON.2016.7491750>, платный (дата обращения: 20.10.2017).

2. Бутузов Д.В. Математическая модель испытательной установки химического реактора с водяной рубашкой / Д.В. Бутузов; науч. рук. И.А. Тутов // Молодежь и современные информационные технологии: сб. трудов XIV Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск: Изд-во ТПУ, 2016. – Т. 1. – С. 319–320.

3. Алфёров С.М. Моделирование датчика давления для настройки манометров / С.М. Алфёров., А.М. Коринов // Доклады ТУСУРа. – 2012. – № 2(26). – С. 193–198.

4. Бутузов Д.В. Разработка испытательного стенда нагревательной установки с водяной рубашкой / Д.В. Бутузов; науч. рук. И.А. Тутов // Молодежь и современные информационные технологии: сб. трудов XIII Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск: Изд-во ТПУ, 2016. – Т. 1. – С. 223–224.

5. Shchelkanova T.A. The need of regularization for the synthesis of multi loop control systems. Proceedings of IV Russian-Korean scientific and technical seminar // Journal of Physics: Conf. Series. – 2016. – Vol. 803, № 1 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/803/1/012179/pdf>, свободный (дата обращения: 15.10.2017).

6. Goncharov V.I. The synthesis of multi-loop control systems / V.I. Goncharov, T.A. Shchelkanova // Proceedings of 2014 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, MEACS 2014. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. – 2014 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.1109/SIBCON.2016.7491750>, платный (дата обращения: 12.09.2017).

7. Тихонов А.Н. Методы решения некорректных задач / А.Н. Тихонов, В.Я. Арсенин. – 2-е изд. – М.: Наука, 1979. – 286 с.

8. Байрамов К.Р. Подход к разработке обобщенной технологической модели решения некорректных задач определения движения космических аппаратов по измерениям текущих навигационных параметров // Доклады ТУСУРа. – 2010. – № 2 (22), ч. 2. – С. 119–123.

9. Гончаров В.И. Интерполяционный синтез регуляторов систем автоматического управления на основе нулей полиномов Чебышева / В.И. Гончаров, Ф.Д. Нгуен // Доклады ТУСУРа. – 2010. – № 2 (22), ч. 1. – С. 304–309.

10. Анализ и оптимальный синтез на ЭВМ систем управления / под ред. А.А. Воронова, И.А. Огурка. – М.: Наука, 1984. – 344 с.

Емельянова Татьяна Алексеевна

Аспирант каф. систем управления и мехатроники (СУМ)
Института кибернетики (ИК)
Национального исследовательского
Томского политехнического ун-та (НИТПУ)
Тел.: +7-952-885-23-28
Эл. почта: emelyanova_ta@tehtsk.ru

Гончаров Валерий Иванович

Д-р техн. наук, профессор каф. СУМ НИТПУ
Тел.: +7 (382-2) 70-18-37
Эл. почта: gvi@tpu.ru

Дементьев Юрий Николаевич

Канд. техн. наук, зав. каф.

электропривода и электрооборудования

Энергетического института НИТПУ

Тел.: +7 (382-2) 60-61-05

Эл. почта: dementiev@mail2000.ru

Тутов Иван Андреевич

Ассистент каф. СУМ

Тел.: +7(923) 413-3887

Эл. почта: ivantutov@tpu.ru

Emelyanova T.A., Goncharov V.I.,

Dement'ev Y.N., Tutov I.A.

Synthesis of a two-loop control system for a chemical reactor using a numerical method with regularization

The paper presents a mathematical model of a chemical reactor for creating heat-resistant plastic. The synthesis of the temperature controllers of the multi-loop automatic control system based on the real interpolation method was carried out. The results for the synthesis of regulators of a multi-loop system are presented.

Keywords: chemical reactor, heat-resistant plastic, temperature, contour automatic control system, real interpolation method.

УДК 681.513

А.А. Воевода, К.М. Бобобеков

Активная идентификация параметров ПИ-регулятора в системе автоматического управления неустойчивым объектом первого порядка

Предлагается алгоритм активной идентификации параметров регулятора, стабилизирующего одноканальный неустойчивый объект первого порядка, входящего в систему управления. Для управления неустойчивым объектом рассчитан регулятор полиномиальным методом. Ввиду требования астатизма выбран пропорционально-интегральный регулятор. Суть методики состоит в подаче периодического сигнала (синусоиды) определенной частоты и амплитуды. Для определения параметров регулятора приведено семейство годографов Найквиста для замкнутой системы при значениях параметров регулятора в заданном диапазоне. Амплитуда и фаза установившегося значения выходного сигнала используются для построения специальной номограммы, которая дает возможность определять параметры регулятора.

Ключевые слова: активная идентификация, система автоматического управления, неустойчивый объект, пропорционально-интегральный регулятор, тестовый синусоидальный сигнал, переходный процесс, псевдогодограф Найквиста, специальная номограмма.

doi: 10.21293/1818-0442-2017-20-4-100-104

Задача идентификации параметров системы автоматического управления (САУ) довольно актуальная. С этой проблемой можно познакомиться, например, по монографиям [1–4]. Идентификация параметров объекта или параметров САУ может решаться при помощи как пассивных методов [5], так и активных методов [1–5], если это допустимо. В преобладающем количестве работ, исследующих активные методы, как правило, предполагается использование статистических методов. Альтернативный подход – использование тестовых воздействий. В настоящее время активно развиваются методы планирования таких воздействий на объект (САУ), при которых достигается оптимальное решение задачи идентификации [1, 5–7]. Идентификация параметров неустойчивого объекта усложняется из-за того, что исследование приходится проводить для замкнутой системы, включающей регулятор. Данная работа продолжает исследования по активной идентификации параметров системы, включающей неустойчивый объект, при помощи периодических тестовых сигналов.

В [8] исследуется задача активной идентификации параметров неустойчивого объекта первого порядка, входящего в САУ, включающего пропорционально-интегральный (ПИ) регулятор, который можно рассматривать как некоторое приближение к модели реального неустойчивого объекта.

К таким системам можно отнести системы, включающие пропорционально-дифференцирующий (ПД) регулятор и неустойчивый объект второго порядка с интегратором $W_{obj}(s) = k/s(1 - \tau s)$. Задачи идентификации параметров регулятора для вышеуказанных систем совершенно идентичны. К последнему классу систем можно отнести, например, управление вертикальным взлетом самолета [9. Р. 434] или управление движением протеза ноги человека [9. Р. 545].

Для определения параметров объекта построена специальная номограмма по результатам прохождения тестового сигнала типа меандра со специально подобранными значениями амплитуды и частоты через систему управления. Для построения номограммы, связывающей параметры объекта и значения выходного сигнала в фиксированные моменты времени, моделировалась система при различных значениях параметров объекта. При помощи этой номограммы имеется возможность определения параметров объекта с ошибкой, не превышающей 5–7%.

Методика, предложенная в [8], далее была модифицирована для более сложного неустойчивого объекта второго порядка с интегратором, условно введенным в объект, и регулятором второго порядка. При помощи этой методики идентифицируются два параметра объекта при подаче на вход тестового сигнала типа синусоиды. В [10] решается задача идентификации двух параметров объекта при подаче на вход тестового сигнала типа меандра и наконец в [11] – идентификация двух параметров объекта при подаче на вход тестового сигнала типа наложение двух меандров. В [10, 11] в качестве объекта взят перевернутый маятник на тележке по каналу «задание – угол отклонения».

Задача активной идентификации параметров более сложного объекта с одним входом и двумя выходами решена в [12]. Примером такого объекта может служить перевернутый маятник на тележке. Для определения параметров объекта построены специальные номограммы и таблицы. В таблицы заносили значения углового положения маятника и положение тележки, измеренные в фиксированные моменты времени, после пуска САУ при фиксированном начальном угловом положении маятника. Такие эксперименты проведены для ряда значений трех параметров объекта, которые необходимо идентифицировать. По этим таблицам были построены номограммы, связывающие значения идентифици-

руемых параметров объекта с измеренными значениями переходных процессов.

В некоторых случаях требуется умение оценить параметры регулятора, входящего в САУ. В данной работе предлагается активный метод решения такой задачи для системы стабилизации неустойчивого объекта, существенно проще модели перевернутого маятника, при помощи ПИ-регулятора. Далее предполагается развитие этой методики уже для модели перевернутого маятника. В отличие от работ [8, 10, 11, 13, 14], где в качестве тестовых сигналов использовались сигналы типа меандров и их комбинаций, здесь используется синусоидальный тестовый сигнал. Параметры тестовой синусоиды определяются на основе анализа годографа Найквиста замкнутой системы. Этот годограф ввиду специфического использования для анализа замкнутой системы в работе называется псевдогодографом Найквиста [14]. Анализ состоит в выборе такой частоты, при которой параметры псевдогодографа Найквиста наиболее чувствительны к вариациям параметров регулятора. Далее строится специальная номограмма, «связывающая» амплитуду и фазу установившегося значения выходного сигнала системы с конкретными параметрами ПИ-регулятора. Для этого необходимо провести серию экспериментов, состоящую в подаче тестовой синусоиды на систему при различных значениях параметров регулятора. Работоспособность предлагаемого алгоритма проверена посредством измерения параметров синусоиды на выходе САУ, нанесения соответствующей точки на диаграмму и определения искомых параметров регулятора.

Постановка задачи

В данной работе решается задача активной идентификации параметров регулятора

$$W_r(s) = (\beta s + \alpha) / s,$$

охваченного обратной связью с неустойчивым объектом первого порядка

$$W_{obj}(s) = k / (1 - \tau s),$$

параметры которого считаем известными. В передаточной функции регулятора α и β -параметры, подлежащие определению (идентификации), а в передаточной функции объекта k и τ – известные параметры объекта. Соответствующая структурная схема САУ, или, если воспользоваться рекомендациями ГОСТ 2.701–76 и стандартом СЭВ 651–77, более корректно назвать ее алгоритмической структурной схемой [15, 16], приведена на рис. 1, где v – задание, y – выходной сигнал системы, e – отклонение выходного сигнала от задающего сигнала.

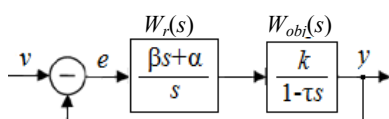


Рис. 1. Операторно-структурная схема системы

Запишем передаточную функцию замкнутой системы (ПФЗС) [17, 18]:

$$W_{зам}(s) = \frac{W_r(s)W_{obj}(s)}{1 + W_r(s)W_{obj}(s)} = \frac{(\alpha + \beta s) \frac{k}{1 - \tau s}}{1 + \frac{(\alpha + \beta s) \frac{k}{1 - \tau s}}{s}} = \frac{k\beta s + k\alpha}{-\tau s^2 + (1 + k\beta)s + k\alpha}. \quad (1)$$

Знаменатель передаточной функции системы (1) (характеристический полином замкнутой системы – ХПЗС) – полином второй степени. Зададим полюса системы равными, например, $\{-1, -1\}$:

$$\tau s^2 - (1 + k\beta)s - k\alpha = s^2 + 2s + 1.$$

Пусть значения параметров объекта следующие: $k=2$ и $\tau=1$. В статье используется описание системы в относительных переменных и с относительным временем. После подстановки параметров объекта

$$s^2 - (1 + 2\beta)s - 2\alpha = s^2 + 2s + 1 \quad (2)$$

определим параметры регулятора полиномиальным методом [19, 20]:

$$\alpha = -0,5, \beta = -1,5. \quad (3)$$

Область допустимых значений параметров регулятора (α, β) считаем известной и, по крайней мере, она принадлежит области $\alpha < 0, \beta < 0,5$, что нетрудно получить из анализа характеристического полинома замкнутой системы:

$$s^2 - (1 + 2\beta)s - 2\alpha.$$

Для иллюстрации методики идентификации параметров регулятора в статье рассмотрен случай принадлежности параметров регулятора интервалам

$$\alpha \in [-0,25; -1,25], \beta \in [-1; -2],$$

которые соответствуют прямоугольной области в плоскости параметров регулятора. В общем случае область может быть и непрямоугольной, что не усложняет процедуру идентификации. На рис. 2 приведены переходные функции в системе для нескольких значений параметров регулятора. Параметры регулятора выберем из указанных интервалов, например, с равномерным шагом:

$$\begin{cases} \alpha = \{-0,25; -0,5; -0,75; -1; -1,25\}, \\ \beta = \{-1; -1,25; -1,5; -1,75; -2\}. \end{cases} \quad (4)$$

Переходные функции в системе для указанных значений параметров регулятора, часть из которых приведена на рис. 2, имеют колебательный характер. Переходная функция при значениях параметров регулятора (3) соответствует передаточной функции замкнутой системы

$$W_{зам}(s) = \frac{3s + 1,5}{s^2 + 2s + 1,5},$$

в отличие от других допустимых значений выделена толщиной линии.

Далее перейдем к решению задачи определения параметров регулятора по результатам активного эксперимента.

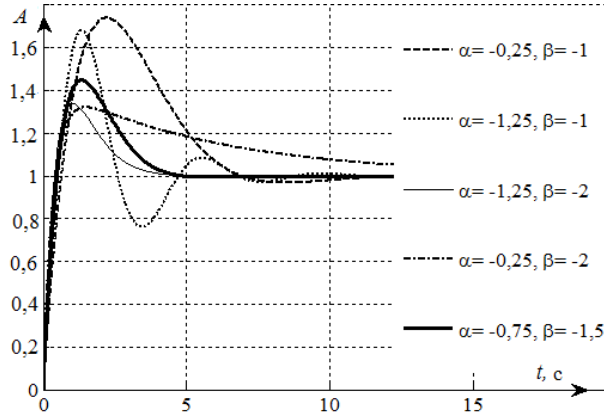


Рис. 2. Переходные функции в системе для нескольких значений параметров регулятора

Построение специальной номограммы для идентификации параметров регулятора

В отличие от работ [8, 10–13, 21], в которых в качестве тестовых воздействий использован периодический сигнал типа меандра, двойного меандра или синусоиды, в данной работе используется синусоидальный сигнал для оценки параметров регулятора. Значения параметров регулятора (4) соответствуют точкам сетки на рис. 3, пронумерованным от 1 до 25.

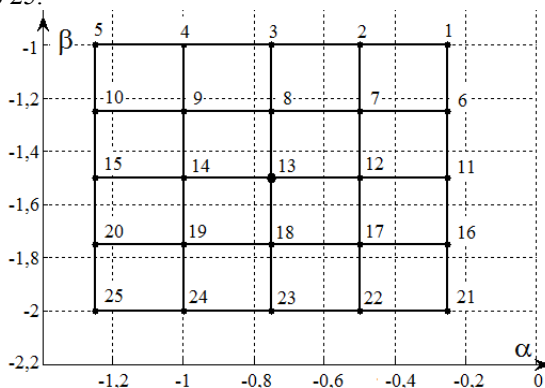


Рис. 3. Вариация параметров регулятора при $\alpha \in [-0,25; -1,25]$ и $\beta \in [-1; -2]$

С целью выбора частоты тестового сигнала построено семейство псевдогодографов Найквиста (годограф Найквиста замкнутой системы), которое приведено на рис. 4, за исключением начальных участков, соответствующих частотному интервалу $\omega = [0; \approx +0,4)$,

которые не несут полезной информации. Семейство годографов построено для параметров регулятора в соответствии с рис. 3, что соответствует двадцати пяти годографам.

На рис. 4 семейство годографов, выходящих из одной точки при значениях параметров

$$\beta = -1 \text{ и } \alpha = \{-0,25; -0,5; -0,75; -1; -1,25\},$$

отмечены соответствующей надписью. Оставшиеся четыре семейства могут быть оснащены аналогичными надписями. Точки годографов, соответствующие $\omega = 1,4$ рад/с, соединены ломаными линиями. Из рис. 4 следует, что при $\omega = 1,4$ рад/с линии до-

вольно хорошо «разошлись» (вариация существенная) и, таким образом, можно проводить активную идентификацию при выбранной частоте. Это соответствует сигналу с периодом $T = 4,49$ с. Выбор амплитуды тестового сигнала в общем случае зависит от уровня шумов. В данной задаче предполагаем, что шумы незначительные, и поэтому выберем амплитуду равной единице. Переходный процесс заканчивается примерно через 7 с (рис. 5). Необходимая информация о параметрах регулятора, как следует из рис. 4, может быть получена в результате измерения амплитуды и сдвига по фазе выходного сигнала.

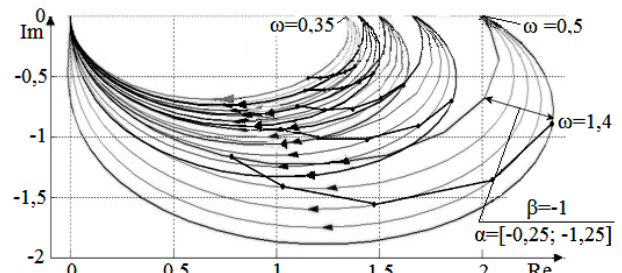


Рис. 4. Семейство псевдогодографов Найквиста при значениях параметров регулятора, соответствующих (4)

Строим номограмму, в которой по оси X откладываются значения амплитуды выходного сигнала A , а по оси Y – значения фазы φ (рис. 6). Также на рис. 5 приведена входная синусоида, что позволяет вычислять фазу φ выходного сигнала.

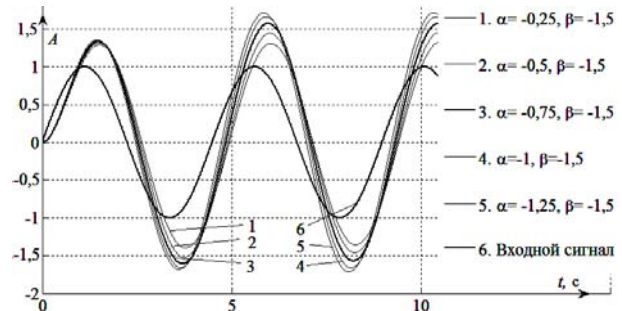


Рис. 5. Переходные функции в системе при подаче входной синусоиды

На плоскости « $A-\varphi$ » в результате замеров получаем 25 точек, что позволяет построить номограмму для определения значений параметров регулятора (α, β), которые лежат в пределах $\alpha \in [-0,25; -1,25]$ и $\beta \in [-1; -2]$.

Пример оценки параметров регулятора

Покажем, каким образом используется номограмма на рис. 6 в процессе идентификации параметров регулятора. Допустим, параметры регулятора соответствуют значениям $\alpha = -0,85$ и $\beta = -1,16$. На систему подаем синусоидальный сигнал с параметрами

$$A = 1, \quad \omega = 1,4 \text{ рад/с.}$$

После окончания переходного процесса измеряем амплитуду и сдвиг по фазе выходного сигнала:

$$(A, \varphi) = (2, -35^\circ).$$

Эти значения откладываем по оси A и φ , что соответствует точке K (рис. 6). Используя интерполяцию, получаем $\alpha = -0,875$ и $\beta = -1,16$. Идентифицированные значения параметров регулятора отличаются от истинных значений не более чем 5–8%.

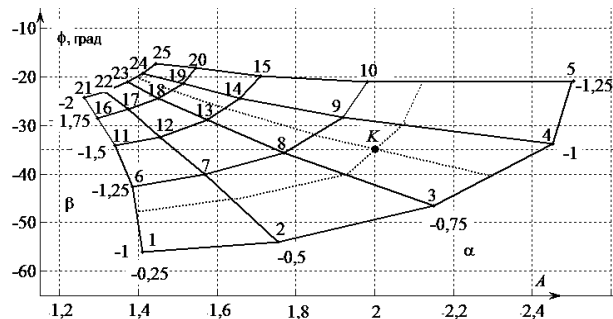


Рис. 6. Номограмма для определения параметров регулятора по измеренным значениям A и φ

Задача активной идентификации параметров регулятора решена.

Заключение

В данной работе в отличие от [8], где исследуются методики активной идентификации параметров неустойчивого объекта, входящего в САУ, приведен метод активной идентификации параметров регулятора, стабилизирующего неустойчивый объект. Суть метода состоит в подаче тестового периодического воздействия с частотой, при которой система управления наиболее чувствительна к изменениям параметров регулятора. Для определения частоты тестового сигнала было построено семейство псевдографов Найквиста замкнутой системы, при которой годограф наиболее чувствителен к изменению параметров регулятора. Амплитуда и фаза выходного сигнала измеряются при различных значениях параметров регулятора. По результатам измерения построена специальная номограмма для определения параметров регулятора. Приведен пример, демонстрирующий процедуру идентификации параметров регулятора по предлагаемой методике.

Предложенная методика идентификации может быть обобщена для более сложных объектов, что, по-видимому, потребует усложнения тестового сигнала. Кроме того, следует развить предложенную методику активной идентификации с целью поиска оптимальной в смысле минимума дисперсии оценки оцениваемых параметров.

Литература

1. Mehra R.K. Optimal Input for Linear System Identification // IEEE Trans. Autom. Control – 1974. – Vol. 19, No. 3. – P. 192–200.
2. Льюнг Л. Идентификация систем: теория для пользователя / под ред. Я.З. Цыпкина. – М.: Наука, 1991. – 432 с.
3. Ljung L. System identification. Theory for the User. – Second Edition – N.J.: PTR Prentice Hall, 1999. – 315 p.
4. Дилигенская А.Н. Идентификация объектов управления: учеб. пособие. – Самара: Изд-во СГТУ, 2009. – 136 с.

5. Бильфельд Н.В. Использование пассивного эксперимента при идентификации объектов управления с изменяющимися свойствами // Молодой ученый. – 2013. – № 8 (55). – С. 77–82.

6. Трошина Г.В. Активная идентификация линейных динамических дискретных стационарных объектов во временной области / Г.В. Трошина: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01. – Новосибирск: Новосиб. гос. техн. ун-т, 2007. – 171 с.

7. Трошина Г.В. О комплексе программ для решения задачи идентификации линейных динамических дискретных стационарных объектов // Сборник научных трудов НГТУ (Новосибирск). – 2008. – № 4 (54). – С. 39–46.

8. Troshina G.V. Active identification of parameters for the unstable object / G.V. Troshina, A.A. Voevoda, K.M. Bobobekov // XI Междунар. форум по стратегическим технологиям, IFOST–2016: Новосибирск, 1–3 июня, 2016 г. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – С. 594–596.

9. Dorf R.C. Modern control systems – Twelfth Edition / R.C. Dorf, R.H. Bishop. – Harlow: PEARSON, 2011. – 1111 p.

10. Troshina G.V. The periodic signals application for the estimation of the unstable object parameters / G.V. Troshina, A.A. Voevoda, K.M. Bobobekov // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conference series. – 2017. – Vol. 803. – Art. 012166 (5 p.). – URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/803/1/012166/pdf> (дата обращения: 01.11.2017).

11. Бобобеков К.М. Идентификация параметров линейаризованной модели перевернутого маятника: тестовый сигнал – двойной меандр // Сборник научных трудов. – Новосибирск, 2016. – № 3 (85). – С. 7–17.

12. Troshina G.V. Unstable object parameters estimation with one input and two outputs in automatic control system / G.V. Troshina, A.A. Voevoda, K.M. Bobobekov // 18th International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices, EDM–2017: proc., Altai, Erlagol, June 29–July 3, 2017. – Novosibirsk: NSTU, 2017. – P. 138–141.

13. Voevoda A.A. Active identification of the inverted pendulum control system / A.A. Voevoda, G.V. Troshina // Proc. of the 18th Intern. conf. on soft computing and measurements (SCM'2015). – Sankt-Peterburg: LETI Publ., 2015. – Vol. 1. – P. 153–156.

14. Бобобеков К.М. Псевдо-годограф Найквиста // Сборник научных трудов НГТУ. – Новосибирск, 2016. – № 2 (84). – С. 49–57.

15. Малышенко А.М. Сборник тестовых задач по теории автоматического управления / А.М. Малышенко, О.С. Вадутов. – СПб.: ЛАНЬ, 2016. – 368 с.

16. Воронов А.А. Устойчивость, управляемость, наблюдаемость. – М.: Наука, 1979. – 336 с.

17. Doyle J.C. Feedback control theory / J.C. Doyle, B. Francis, A. Tannenbaum. – London: Macmillan Publishing, 1990. – 198 p.

18. Ким Д.П. Теория автоматического управления. – Т. 1: Линейные системы. – М.: Физматлит, 2003. – 288 с.

19. Воевода А.А. Полиномиальный метод синтеза: стабилизация перевернутого маятника / А.А. Воевода, Е.В. Шоба // Сборник научных трудов НГТУ. – Новосибирск, 2012. – № 2 (68). – С. 15–30.

20. Воевода А.А. Расчет параметров регулятора для стабилизации перевернутого маятника по углу отклонения / А.А. Воевода, К.М. Бобобеков // Сборник научных трудов НГТУ. – Новосибирск. – 2016. – № 3 (85). – С. 18–32.

21. Troshina G.V. The parameters determination of the inverted pendulum model in the automatic control system /

G.V. Troshina, A.A. Voevoda, K.M. Bobobekov // XIII международ. науч.-техн. конф. «Актуальные проблемы электронного приборостроения», АПЭП–2016, Новосибирск, 3–6 октября 2016 г. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – С. 180–182.

Воевода Александр Александрович

Д-р техн. наук, профессор каф. автоматике
Новосибирского гос. технического ун-та (НГТУ)
Тел.: +7-913-922-30-92
Эл. почта: Voevoda@ucit.ru

Бобобеков Курбонмурод Мулломиракович

Аспирант каф. автоматике НГТУ
Тел.: +7-953-885-32-23
Эл. почта: kurbon_111@mail.ru

Voevoda A.A., Bobobekov K.M.

Active identification of PI-regulator parameters in the automatic control system for an unstable first-order object

The algorithm to identify parameters of the regulator stabilizing the single channel unstable first-order object incoming in the control system is proposed. In order to control an unstable object, the regulator was calculated using the polynomial method. Due to the requirements of astaticism a proportional-integral regulator was chosen. The main point of the method consists in injecting a periodic signal (sinusoids) of a certain frequency and amplitude. To determine the regulator parameters a family of Nyquist hodographs was proposed for a closed system at the regulator parameters values within the specified range. The amplitude and phase of the steady-state value of the output signal are used to construct a special nomogram, which makes possible to determine the regulator parameters.

Keywords: active identification, automatic control system, unstable object, proportional-integral regulator, transient, Nyquist pseudohodograph, test sinusoidal signal, special nomogram.

УДК 528: 873

М.Ю. Катаев, А.А. Бекеров

Методика обнаружения водных объектов по многоспектральным спутниковым измерениям

Приводится описание методики обнаружения водных объектов из многоспектральных спутниковых измерений прибором Landsat-8. Обнаружение проводится на основе сравнительного анализа значений водных индексов NDWI, MNDWI, NDMI, WRI, NDVI и AWEI. Проводится описание результатов обработки реальных изображений для территории в районе г. Томска.

Ключевые слова: спутниковые измерения, водные объекты, водные индексы, водная маска.

doi: 10.21293/1818-0442-2017-20-4-105-108

Климатические изменения, которые произошли за последние десятилетия, ускорившийся темп урбанизации и технологического развития приводят к изменениям всех компонент атмосферы и поверхности Земли. Одной из таких компонент являются поверхностные водные объекты планеты (реки, грунтовые воды, озера). Вода является важным элементом для существования различных экосистем, в том числе и для существования человечества. Как отсутствие, так и избыток воды приводят к чрезвычайным изменениям в любых отраслях народного хозяйства. Поэтому обнаружение водных объектов и последующий контроль являются важным процессом в научных и практических исследованиях. Фактически в настоящее время отсутствует мониторинг водных объектов, который показывает изменение числа водных объектов и их площади, береговой линии и их типа.

Развитие технологий дистанционного зондирования позволяет проводить регулярные многоспектральные измерения земной поверхности. Математические методы обработки данных дистанционного зондирования позволяют получать информацию о пространственно-временных параметрах поверхности Земли, в том числе и водных объектов. Одним из таких параметров является водная маска, позволяющая на спутниковом изображении определить пиксели, в которых находятся водные объекты. Целью данной работы является разработка методики дешифрирования многоспектральных изображений спутникового прибора Landsat-8 для определения водных объектов и построения водных масок.

Постановка задачи

Мониторинговые спутниковые системы регулярно передают многоспектральные изображения поверхности Земли [1, 2]. Основой измерений является спектральная специфика отражения различных типов поверхности и рельеф [3]. На рис. 1 представлены спектральные кривые коэффициента отражения водной поверхности.

Одним из популярных спутниковых приборов среднего пространственного разрешения, измеренные многоспектральные изображения которых применяются в научных и практических задачах, является Landsat-8 [https://landsat.usgs.gov/landsat-8]. Приборы, расположенные на борту космического

аппарата, позволяют измерять многоспектральные (от видимой до ИК-области спектра) изображения земной поверхности. Полученные изображения необходимо корректировать, чтобы компенсировать вклад атмосферы, связанный с поглощением газами и рассеиванием излучения аэрозолями. Для получения однородных по качеству изображений земной поверхности необходимо проводить топографическую коррекцию, которая учитывает эффекты рельефа местности, зенитного и азимутального угла Солнца и расстояния между Землей и Солнцем [4]. Результат применения радиометрической, атмосферной и топографической коррекции для пятого спектрального канала Landsat-8 приведен на рис. 2.

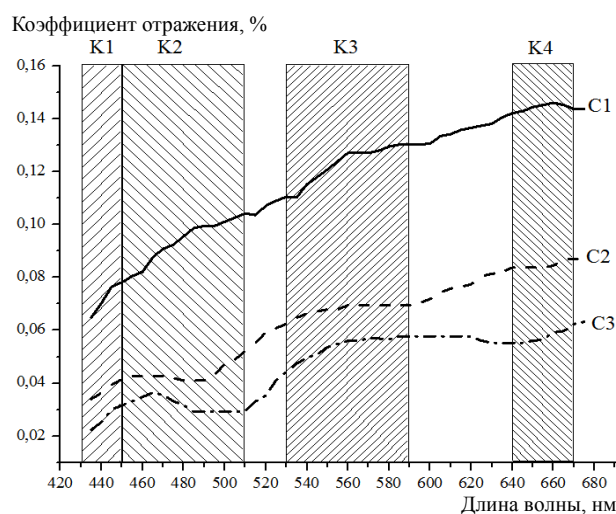


Рис. 1. Спектральные кривые коэффициента отражения водной поверхности (C1, ..., C3 – вода пресная, различной мутности, C1 – наиболее чистая); K1, ..., K4 – четыре первых спектральных канала Landsat-8

В настоящее время основным и наиболее распространенным методом дешифрирования является визуальное дешифрирование, когда распознавание водных объектов на основе цветовых синтезированных изображений. Главная проблема этого подхода связана с анализом нескольких изображений одновременно. Это делается для того, чтобы детализировать береговую линию, которая на синтезированных изображениях отображается по-разному. Процесс дешифрирования таким подходом трудоемок и длителен [5].

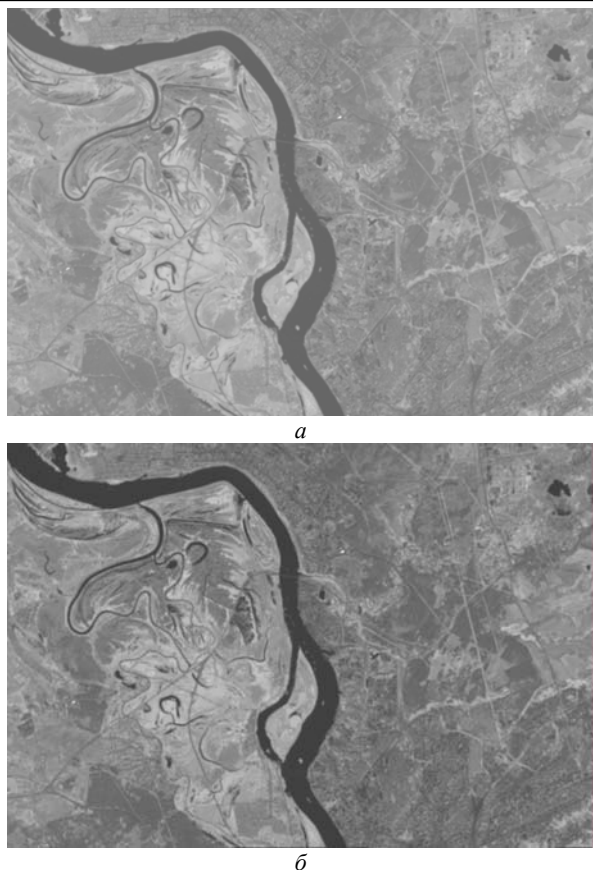


Рис. 2. Результаты радиометрической, атмосферной и топографической коррекции для пятого спектрального канала Landsat-8: *а* – до коррекции; *б* – после коррекции

Процесс поиска водных объектов на основе набора измеренных многоспектральных изображений позволяет обнаруживать их по характеристикам отражательной способности природных объектов [6–8] (см. рис. 1). Водные объекты характеризуются самыми низкими значениями коэффициентов отражения среди других природных объектов. При этом все другие природные объекты даже в состоянии увлажненности имеют больший коэффициент отражения. Этот факт используется при обнаружении водных объектов на измеренном изображении.

Методика выделения водных объектов

Для обнаружения водных объектов по космическим многоспектральным изображениям широко используются следующие индексы: NDWI, NDMI, MNDWI, WRI, NDVI, AWEI. Автоматизированный индекс выделения воды (AWEI) позволяет эффективно разделить водные и неводные пиксели за счет одновременного использования четырех спектральных каналов Landsat-8. Коэффициенты в выражении для этого индекса эмпирически подобраны таким образом, чтобы наблюдалось максимальное отличие водных пикселей от пикселей различных типов растительного покрова. Нормализованный вегетационный индекс NDVI является наиболее известным индексом, используемым на практике, и показывает наличие и состояние растительности на момент измерений. Основой индекса является контраст отражательных характеристик с максимальным погло-

щением пигментом хлорофилла (красный канал) и высокой отражательной способностью растительного покрова (инфракрасный канал). Индекс нормированной разности вод (NDWI) рассчитывается на основе канала ближнего инфракрасного диапазона и канала в коротковолновом инфракрасном (SWIR). В табл. 1 представлены формулы для вычислений индексов, используемых в работе.

Таблица 1
Многоспектральные индексы, используемые для определения водных объектов

Индекс	Выражение	Диапазон значений
Normalized Difference Water Index	$NDWI = (GREEN - NIR) / (GREEN + NIR)$	Вода имеет положительное значение
Normalized Difference Moisture Index	$NDMI = (NIR - MIR) / (NIR + MIR)$	Вода имеет положительное значение
Modified Normalized Difference Water Index	$MNDWI = (GREEN - MIR) / (GREEN + MIR)$	Вода имеет положительное значение
Water Ratio Index	$WRI = (GREEN + RED) / (NIR + MIR)$	Вода имеет значение больше 1
Normalized Difference Vegetation Index	$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$	Вода имеет отрицательное значение
Automated Water Extraction Index	$AWEI = 4 \times (GREEN - MIR) - (0,25 \times NIR + 2,75 \times SWIR)$	Вода имеет положительное значение

Выбор территории исследований

С источника данных [<https://aws.amazon.com/ru/public-datasets/landsat/>] были получены многоспектральные изображения спутника Landsat-8. Космические изображения связаны с координатами (56,96209; 82,34735); (57,04714; 86,38850); (54,73712; 82,60631); (54,81538; 86,42267). Каждое изображение имеет одиннадцать спектральных каналов с пространственным разрешением 30 м (8281 строка и 8191 столбец). Эта область интересна тем, что содержит разнообразные физико-географические зоны с богатой почвой и растительностью, включая множество водных объектов. Особенностью этой территории является наличие двух больших рек – Томь и Обь, а также мелких и крупных озер. Для исследований были взяты спутниковые снимки за май, июнь, август, октябрь 2016 г. с минимальным содержанием облачности (< 5%) или безоблачные.

Результаты выделения водных объектов по данным Landsat-8

Значения для индексов AWEI, NDWI, NDMI, MNDWI, NDVI лежат в диапазонах $[-1; 1]$. В табл. 1 указаны диапазоны значений, при которых пиксель с наибольшей вероятностью связан с водным объектом. Для каждого индекса строились фильтры на основе учета диапазона значений указанных выше индексов, позволяющих выделять водные объекты

Таблица 3

(бинаризация изображений: 0 – неводные объекты и 1 – водные объекты). Проводилось сравнение водных масок для каждого фильтра с эталонной маской водного объекта. Эталонная водная маска с разрешением 30 м получена при построении рельефа местности, полученного в проекте «Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)» [https://dds.cr.usgs.gov/srtm].

Оценка точности обнаружения водных объектов получена путем деления суммы верно классифицированных пикселей водного объекта, полученного с помощью водного индекса, к общему числу пикселей эталонной маски:

$$O = 100 \times |Nw - Nwm| / Nwm, \% \quad (1)$$

Здесь Nw – число водных пикселей анализируемого изображения и Nwm – число водных пикселей эталонной маски.

Для оценки точности классификации типов поверхности по спутниковым изображениям принято рассчитывать коэффициент Каппа [10], значения которого лежат в диапазоне [-1; 1]. Положительное значение коэффициента Каппа показывает высокую точность, а нулевое и отрицательное значение показывает отсутствие корреляции в классификации.

$$Ka = (N \sum X_{ii} - \sum (X_{io} X_{oi})) / (N^2 - \sum (X_{io} X_{oi})),$$

где N – число пикселей на изображении; $i = 1; P$ – число классов; $\sum X_{ii}$ – сумма элементов матрицы.

Полученные результаты

В табл. 2 приведены результаты оценки точности выделения водных объектов для водных индексов AWEI, WRI, NDWI, NDMI, MNDWI, NDVI. Видно, что точность обнаружения водных объектов высокая и максимально близкая к эталонной маске. Для некоторых индексов были проведены дополнительные расчеты, учитывая различные варианты диапазонов значений принадлежности пикселей к водным объектам. Это позволило более точно найти пороги значений, при которых пиксель можно считать принадлежащим водным объектам.

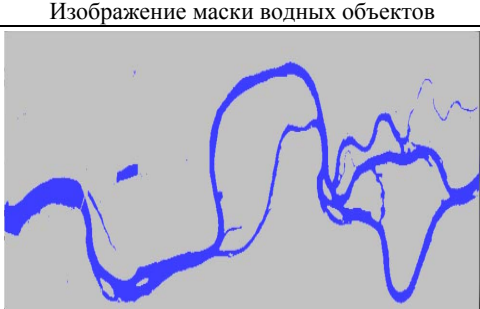
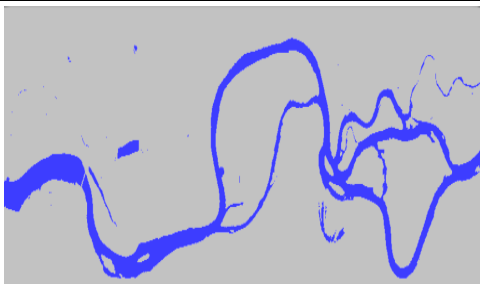
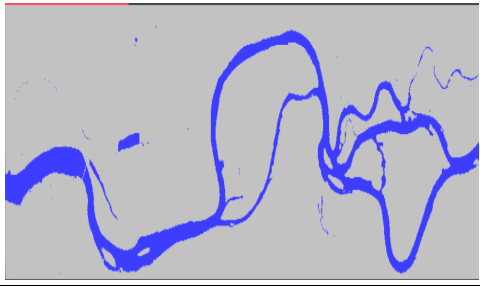
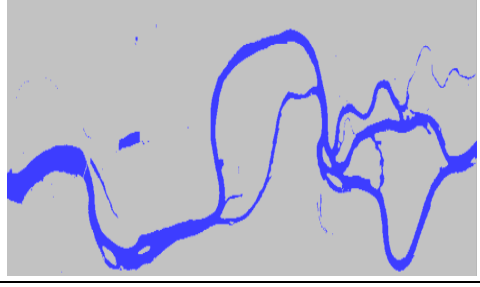
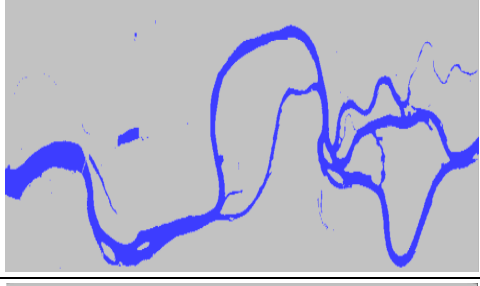
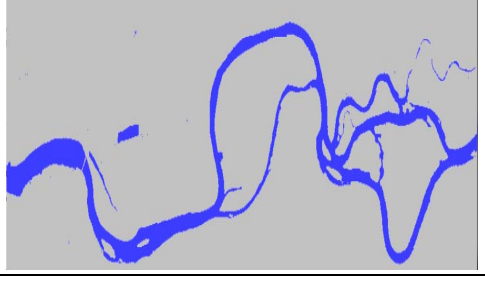
Таблица 2

Точность выделения водных объектов для водных индексов

Название метода	Диапазон значений поиска	Общая точность, %	Коэффициент Каппа
WRI	>1,0	98,7	0,975
NDWI	>0,0	98,1	0,987
	>0,18	98,7	0,975
MNDWI	>0,0	98,4	0,969
	>0,18	98,7	0,975
AWEI	>0,0	98,7	0,974
	>0,16	99,3	0,987
NDVI	-0,45 ... -0,25	98,7	0,974
	<0,0	93,4	0,852
NDMI	>0,0	98,1	0,962
	>0,14	98,0	0,96

В табл. 3 приведены изображения водных масок, полученных для различных водных индексов.

Визуализация маски водных индексов

Индекс	Изображение маски водных объектов
NDVI	
AWEI	
NDWI	
NDMI	
MNDWI	
WRI	

Сравнивая результаты, представленные в табл. 2 и 3, можно отметить, что наиболее хорошо выделяется водный объект с помощью индекса AWEI. Следует отметить, что возможно улучшение точности восстановления водных объектов за счет более точной атмосферной коррекции принимаемых изображений, а также учета спектральной специфики каждого канала, участвующего в расчете водных индексов.

Разносторонние исследования водных объектов суши (с помощью наземных, аэровоздушных и космических приборов) необходимы с практической и научной сторон. Сущность использования много-спектральных данных космических изображений сводится к дешифрированию и выявлению объектов местности. Среди найденных объектов по определенным признакам происходит выделение исследуемого объекта. Далее появляется возможность устанавливать именно для объекта изучения качественные и количественные характеристики.

Заключение

Данная статья показывает сравнительный анализ различных водных индексов, построенных на основе значений для спектральных каналов Landsat-8. На основе водных индексов, строятся фильтры, позволяющие на изображениях земной поверхности выделять водные объекты (реки, озера, искусственные водохранилища). Перед расчетом водных индексов проводится радиометрическая и атмосферная коррекция, позволяющая учесть условия во время съемки и скорректировать интервал яркости получаемого изображения. Результаты обработки реальных данных показали, что наилучшим водным индексом является AWEI среди NDWI, NDMI, MNDWI, NDVI, что показывает визуальный анализ водных масок и результаты оценки точности. Приведены водные маски для каждого индекса.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ, проект № 8.8184.2017/8.9 «Методология создания систем энергогенерирующих и энергопреобразующих устройств для наземных и бортовых комплексов наземного, космического и подводного базирования», а также в рамках проекта РФФИ № 16-05-00901.

Литература

1. Дворкин Б.А. Новейшие и перспективные спутники дистанционного зондирования Земли / Б.А. Дворкин, С.А. Дудкин // Геоматика. – 2013. – № 2. – С. 16–21.
2. Комарова А.Ф. Открытые мультиспектральные данные и основные методы дистанционного зондирования в изучении растительного покрова / А.Ф. Комарова, И.В. Журавлева, В.М. Яблоков // Принципы экологии. – 2016. – № 1. – С. 40–47.

3. Кондратьев К.Я. Аэрокосмические исследования почв и растительности / К.Я. Кондратьев, В.В. Козодеров, П.П. Федченко. – Л.: Гидрометеиздат, 1986. – 231 с.

4. Егоров В.А. Метод радиометрической коррекции искажений отражательных характеристик земного покрова в данных спутниковых измерений, вызванных влиянием рельефа местности / В.А. Егоров, С.А. Барталев // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2016. – Т. 13, № 5. – С. 192–201.

5. Лабутина И.А. Дешифрирование аэрокосмических снимков: учеб. пособие для студентов вузов. – М.: АспектПресс, 2004. – 184 с.

6. Modelling spatial-temporal change of Poyang Lake using multitemporal Landsat imagery / F. Hui, B. Xu, H. Huang, Q. Yu, P. Gong // International Journal of Remote Sensing. – 2008. – Vol. 29, No. 20. – P. 5767–5784.

7. Ji L. Analysis of dynamic thresholds for the normalized difference water index / L. Ji, L. Zhang, B. Wylie // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. – 2009. – Vol. 75, No. 11. – P. 1307–1317.

8. Sun F. Comparison and improvement of methods for identifying waterbodies in remotely sensed imagery / F. Sun, W. Sun, J. Chen, P. Gong // International Journal of Remote Sensing. – 2012. – Vol. 33, No. 21. – P. 6854–6875.

Катаев Михаил Юрьевич

Д-р техн. наук, профессор каф. автоматизированных систем управления (АСУ) ТУСУРа, профессор Юргинского технологического института, филиала Национального исследовательского Томского политехнического университета
Тел.: (382-2) 70-15-36, 8-960-975-27-85
Эл. почта: kataev.m@sibmail.com

Бекеров Артур Александрович

Аспирант Института мониторинга климатозоологических систем СО РАН, Томск
Тел.: (382-2) 70-15-36
Эл. почта: artur@bekerov.ru

Kataev M.Yu., Bekerov A.A.

Methodology of the water objects detection from multi-spectrum satellite measurements

The article describes the method of detecting water objects from multispectral satellite measurements with the Landsat-8 instrument. The detection is based on a comparative analysis of the values of the water indices NDWI, MNDWI, NDMI, WRI, NDVI and AWEI. The description of the results for processing real images of the Tomsk region territories is provided.

Keywords: satellite measurements, water objects, water indices, water mask.

УДК 004.932

М.Ю. Катаев, Н.Г. Катаева, А.П. Коробко, Т.М. Шаймарданов

Методика построения фронтальной скелетной модели фигуры человека по изображениям

Цель работы связана с разработкой методики и алгоритмов построения фронтальной скелетной модели человека в процессе движения по последовательности изображений. Произведен обзор методов, применяемых для анализа походки человека и построения различного рода скелетных моделей. На основе полученных изображений строится скелетная модель человека, которая позволяет детализировать отдельные элементы активности человека в процессе движения.

Ключевые слова: изображение, фигура человека, фронтальное направление, скелетная модель.

doi: 10.21293/1818-0442-2017-20-4-109-112

В настоящий информационный век возникает все больше и больше разнородной информации, которую необходимо научиться обрабатывать и анализировать. Человек пытается познать не только окружающий его мир, но и самого себя. Одним из направлений изучения человека является его двигательная активность, которая составляет одну из частей биометрических данных. Эти данные могут использоваться в различных областях науки и практики, но главными из них на сегодняшний момент являются спорт [1], медицина [2–6] и идентификация личности [7].

Объектом данной работы является двигательная деятельность человека, одной из основных функций которой является ходьба как вид перемещения в пространстве. Особенность поз и движений человека во время ходьбы называют его походкой. Параметры походки и их анализ могут быть полезны в спорте, медицине (для определения состояния пациента, постановки диагноза, реабилитации и др.), решения задач контроля. Походка уникальна для каждого человека, т.к. зависит от множества факторов: пола, возраста, роста, веса, формы фигуры, заболеваний, травм, нервного состояния и др. Вследствие этого походка человека не является статичной, и она может меняться в зависимости от изменения различного рода факторов.

При долговременном изучении двигательной активности, достигнутых результатов, в этом направлении в настоящее время остаются не решенными вопросы диагностических возможностей результатов измерения параметров походки и их пространственно-временного анализа. Существуют не только методические, но и технические трудности, которые ограничивают применение результатов изучения двигательной активности человека [8–13].

Одной из методических проблем является отсутствие простых, надежных способов получения информации о параметрах походки человека. Целью данной работы является методика обработки видеоданных походки человека, на котором нет специальных датчиков или маркеров, с целью построения фронтальной скелетной модели фигуры человека.

Двигательная деятельность человека

Объектом данного исследования является двигательная деятельность человека. Двигательное дей-

ствие – это целенаправленный двигательный акт (поведенческий двигательный акт, сознательно осуществляемый в целях решения какой-либо двигательной задачи), который состоит из последовательного и регулярного набора движений, формирующих шаговую активность движения. В процессе ходьбы человек задействует как верхние, так и нижние конечности. Каждый человек в процессе ходьбы выполняет ряд стереотипных движений, которые циклически повторяются. Совокупность таких движений выделяется в понятие, которое называется походкой человека, она индивидуальна для каждого индивида и произвольно воспроизводится при ходьбе.

Ходьба представляет собой хорошо автоматизированную циклическую локомоцию. Функционально правая и левая ноги практически идентичны, имеются лишь незначительные физиологические асимметрии. Рассмотрим ходьбу с точки зрения цикла шага и его основных параметров. В первую очередь нас будут интересовать временные и пространственные характеристики.

Основной функциональной единицей ходьбы является цикл шага, время от первого контакта с опорой одной ноги до следующего контакта этой же ногой. Цикл шага для ноги состоит из двух основных периодов (фаз): периода опоры и периода переноса. Важными характеристиками походки также могут служить изменение центра тяжести (ЦТ) при ходьбе, а также изменения углов опорных точек (наклоны спины, шеи, изгиб в колене и т.д.).

Центр тяжести человека при ходьбе совершает как боковые, так и вертикальные колебания. Вертикальные колебания могут достигать величины 4 см у взрослого человека, при этом туловище опускается больше всего во время двойной опоры. Боковые движения (качания в стороны) доходят до 2 см. Это хорошо видно, если изобразить колебания ЦТ и такты шага рядом друг с другом, как на рис. 1, а, при фронтальной, а на рис. 1, б – при сагиттальной съемке движения человека.

Из рис. 1, а, б хорошо видно, что вертикальные и боковые движения центра тяжести совершают подобные пространственные перемещения. Отметим, что наиболее изученным направлением является

двигательная активность человека, полученная во фронтальной плоскости измерений.

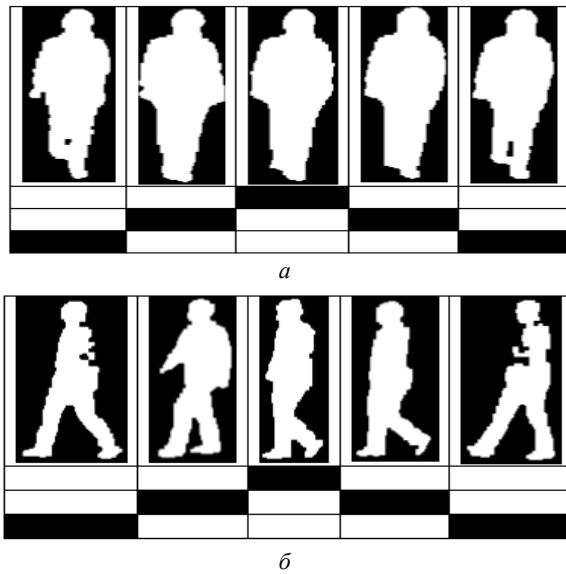


Рис. 1. Положение центра тяжести в различных тактах шага человека во фронтальной (а) и сагиттальной (б) плоскостях

Выделение фигуры человека на изображении

В данном исследовании рассматривается метод видеорегистрации движения человека [14, 15], преимущества которого перед другими в следующем: отсутствие физического контакта, обследуемого с регистрируемой аппаратурой; наличие полной пространственно-временной картины двигательных актов; малый вес маркеров и другого оборудования, носимого человеком (либо их полное отсутствие).

В данной работе используются данные из базы снимков походки CASIA [http://www.cbsr.ia.ac.cn]. База состоит из снимков походки нескольких человек, которые совершают по 4 прохода в сагиттальной плоскости, в том числе и фронтальной. Изображение (из базы данных CASIA) представляет собой сцену, при которой человек делает 4–5 шагов. Эти снимки были предварительно обработаны и бинаризованы – выделены фон и объект (фигура человека). Предварительная обработка включает операцию с переходом от цветового пространства RGB-изображения к IUV и использованием далее компоненты I, с выравниванием контраста и применением методики «серый мир» [16]. После этих манипуляций с изображениями проводились пороговая бинаризация и удаление артефактов с помощью пространственной фильтрации. Полученные изображения представлены на рис. 1. Далее нами проводилось выделение на изображении фигуры человека и запись ее в прямоугольную матрицу размером (126×55), ноль обозначает фон, а единица – это фигура человека.

Серьезной проблемой при выделении фигуры человека являются искажения при ее выделении из видеокadra. Для борьбы с подобными искажениями необходимо проводить изменения формы фигуры

человека, это можно осуществить с помощью морфологических преобразований (рис. 2).

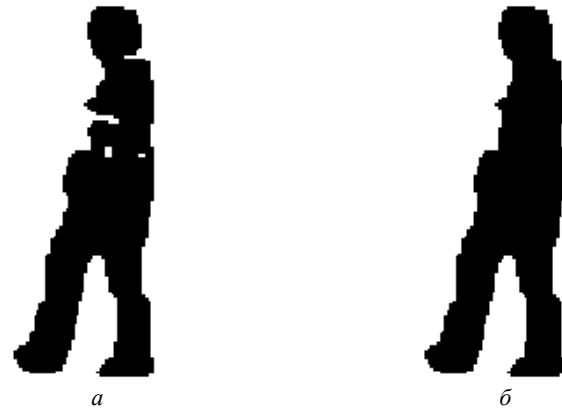


Рис. 2. Изображение до (а) и после (б) морфологических преобразований

Из рис. 2 видно, что морфологические операции позволяют получить качественно лучшую модель фигуры человека за счет заполнения пустот, образующихся на бинаризованной фигуре человека, а также сделать ее более гладкой.

Нами предлагается методика построения скелетной модели, где основной точкой фигуры человека является центр тяжести (с координатами (I_x, I_y)). Для этих целей нами рассмотрен типовой алгоритм по следующим формулам:

$$I_x = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M i \cdot I(i, j)}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M I(i, j)}, \quad I_y = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M j \cdot I(i, j)}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M I(i, j)}, \quad (1)$$

где i – индекс по строкам; j – по столбцам и $I(i, j)$ – это бинарное изображение (0 – фон и 1 – фигура человека).

Построение скелетной модели

Изучение временного поведения центра тяжести позволяет получать множество информации о походке человека. Однако походка человека связана с включением всей фигуры человека в двигательные акты, что невозможно определить, исследуя лишь центр тяжести. Поэтому, кроме ЦТ, осуществляется построение скелетной модели человека на основе бинаризованных изображений, чтобы более глубоко исследовать движение человека и выявить особенности походки.

Скелетную модель можно изобразить с различным количеством степеней свободы (DOF – degrees of freedom). Минимальным количеством DOF можно считать число три, линию спины (от головы до таза) и линию на каждую ногу от таза до лодыжки. В 5 DOF каждая линия для ноги разбивается на две линии – линия бедра и голени. В 6 DOF центральная линия делится на линию спины (от шеи до таза) и на линию головы (от кончика головы до шеи) и т.д. Подключение рук в скелетной модели приводит к расширению степеней свободы. Классическая ске-

летная модель, воспроизводимая широко известным оборудованием Kinect, содержит 21 степень свободы.

Главной задачей этапа построения скелетной модели является нахождение опорных точек и линий, их соединяющих. Основой для определения этих точек может служить знание о пропорциях фигуры человека, например, что высота человека равна примерно восьми, а ширина – трем размерам его «головы» (рис. 3).

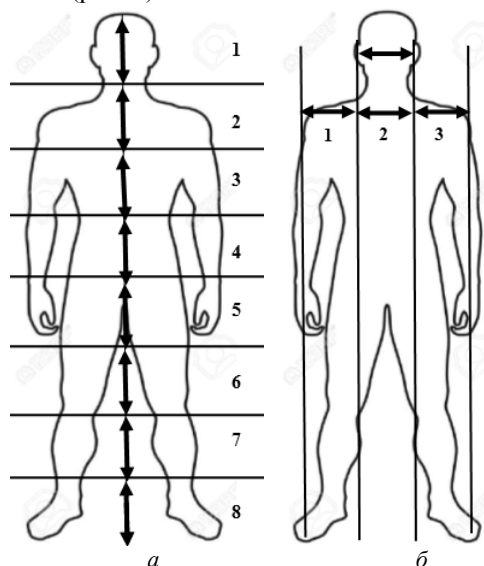


Рис. 3. Разбиение фигуры согласно пропорциям, связанным с размером головы человека: *a* – горизонтально (Н) и *б* – вертикально (V))

Далее, на основе полученной сетки (см. рис. 3), точки скелетной модели находятся как:

- 1) голова – середина блока 1Н–2V;
- 2) шея – середина нижней линии блока 1Н–2V;
- 3) плечи – середина блоков 2Н–1V справа и 2Н–3V слева;
- 4) локти – нижняя линия блока 3Н–1V справа и 3Н–3V слева;
- 5) кисти – в процессе движения положение кисти находится в разных участках блоков 5Н–1V и 5Н–3V;
- 6) ЦТ – центр тяжести располагается в середине блока 5Н–2V;
- 7) бедра – от центра тяжести до середины блоков 5Н–1V и 5Н–3V;
- 8) колени – нижняя линия блока 6Н и середина блоков 1V и 3V;
- 9) ступни – нижняя линия блока 8Н и середина блоков 1V и 3V.

На рис. 4 показано построение скелетной модели по первым трем пунктам предлагаемого алгоритма.

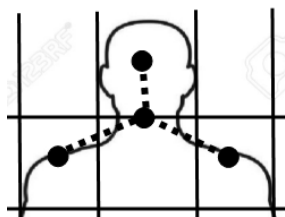


Рис. 4. Пример построения элементов скелетной модели (голова, правое, левое плечо)

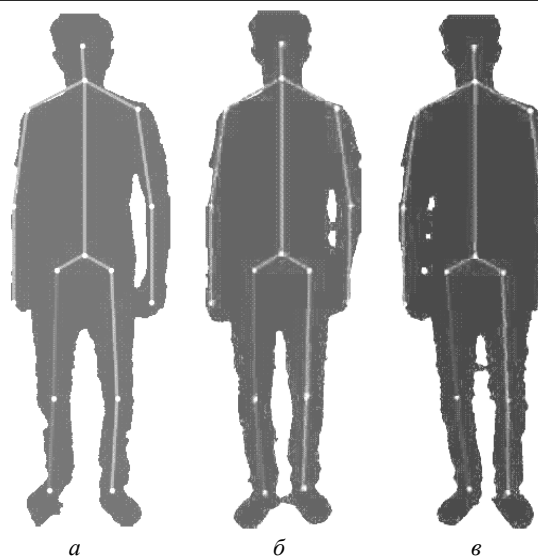


Рис. 5. Скелетная модель фигуры человека в процессе движения: *a*, *б* и *в* – различные акты движения

Приведенный выше алгоритм построения фронтальной модели более подходит для статической модели человека, которая показана на рис. 3, *a*, *б*. Абсолютно понятно, что в процессе движения происходит изменение отдельных элементов каждого участка скелетной модели, но каждый блок (прямоугольный участок на изображении фигуры человека), где происходит изменение, известен. Это обстоятельство дает возможность построить эффективный алгоритм построения скелетной модели фигуры человека (см. рис. 5, *a–в*), который несколько не уступает алгоритму, который заложен в Kinect.

Операции математической морфологии, с помощью которых можно проводить различные сложные преобразования изображений, позволяют решать задачи выделение границ и скелетонизации. Для этих целей нами была использована библиотека Python функций – Scikit-image [http://scikit-image.org]. Нами было выполнено использование этого подхода к получению скелетной модели фигуры человека (рис. 6, *a*, *б*).

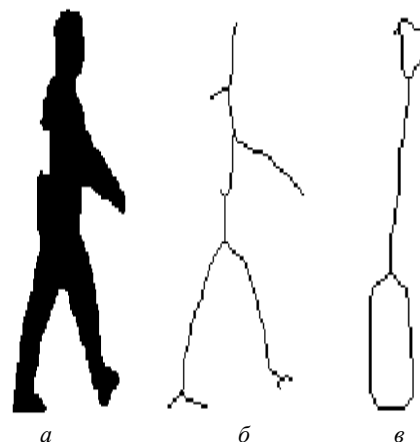


Рис. 6. Пример скелетонизации с помощью морфологических операций: *a* – бинаризованная фигура человека; *б* – удачно построенная скелетная модель и *в* – неудачно построенная скелетная модель

К сожалению, применение алгоритма скелетонизации с помощью морфологических операций не позволяет решить поставленную задачу в автоматическом режиме. Из рис. 6 видно, что получаемая скелетная модель не учитывает анатомию тела человека (см. рис. 6, б) и при даже незначительном зашумлении силуэта (см. рис. 6, а) можно получить скелетную модель фигуры совершенно неудовлетворительную (см. рис. 6, в).

Заключение

В результате проделанной работы получена методика, которая позволяет по бинаризованным изображениям фигуры человека во фронтальной плоскости построить скелетную модель. Проведенные массовые испытания предлагаемой методики позволяют утвердительно говорить об устойчивости воспроизведения скелетной модели, а также соответствии основным анатомическим особенностям фигуры человека. Приложение данной скелетной модели связано с определением углов отклонения каждой части скелетной модели в процессе движения и последующего их анализа. Результаты анализа могут быть востребованы в медицине, спорте или иных приложениях.

Литература

1. Дубровский В.И. Биомеханика / В.И. Дубровский, В.Н. Федорова. – М.: ВЛАДОС-ПРЕСС, 2003. – 672 с.
2. Boulgouris N.V. Gait recognition: A challenging signal processing technology for biometric identification / N.V. Boulgouris, H. Dimitrios, N.P. Konstantinos // IEEE Signal Processing Magazine. – 2005. – № 22(6). – P. 78–90.
3. Батышева Т.Т. Организация лаборатории клинического анализа движений / Т.Т. Батышева, Л.Р. Русина, Д.В. Скворцов // Мед. помощь. – 2004. – № 2. – С. 41–44.
4. Ефимов А.П. Клинически значимые параметры походки / А.П. Ефимов // Травматология и ортопедия России. – 2012. – № 1 (63). – С. 60–65.
5. Бернштейн Н.А. Физиология движений и активность / Н.А. Бернштейн. – М.: Наука, 1990. – 495 с.
6. Скворцов Д.В. Клинический анализ движений, анализ походки. – М.: НПЦ «Стимул», 1996. – 344 с.
7. Hayfron-Acquah J. Automatic gait recognition by symmetry analysis / J. Hayfron-Acquah, M. Nixon, J. Carter // Pattern Recogn. Lett. – 2003. – № 24. – P. 2175–2183.
8. Frame difference energy image for gait recognition with incomplete silhouettes / C. Chen, J. Liang, H. Zhao, H. Hu, J. Tian // Pattern Recognition Letters. – 2009. – No. 30(11). – P. 977–984.
9. Cunado D. Automatic Extraction and Description of Human Gait Models for Recognition Purposes / D. Cunado, M. Nixon, J. Carter // Computer Vision and Image Understanding. – 2003. – № 90 (1). – P. 1–41.
10. Bobick A.F. The recognition of human movement using temporal templates / A.F. Bobick, J.W. Davis // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2001. – № 23 (3). – P. 257–267.
11. Ekinci M. Human Identification Using Gait // Turk. J. Elec. Engin. – 2006. – № 14 (2). – P. 267–291.
12. Aggarwal J.K. Human activity analysis: a review / J.K. Aggarwal, M.S. Ryoo // ACM Computing Surveys. – 2011. – No. 43 (3). – P. 16–43.
13. Boulgouris N.V. Human gait recognition based on matching of body components / N.V. Boulgouris, Z.X. Chi // Pattern Recognition. – 2007. – № 40(6). – P. 1763–1770.
14. Катаев М.Ю. Исследование двигательной активности человека на основе анализа видеоизображений. Аппаратно-программный комплекс / М.Ю. Катаев, Я.А. Хамаганов // Доклады ТУСУРа. – 2010. – № 1 (21), ч. 2. – С. 177–182.
15. Определение и анализ двигательной активности постинсультного пациента из потока изображений / М.Ю. Катаев, С.Г. Катаев, Н.Г. Катаева, В.А. Чистякова // Медицинская информатика. – 2012. – № 4 (34) / – С. 43–50.
16. Абрамов М.О. Влияние методов предобработки на восстановление фигуры движущегося человека из потока изображений / М.О. Абрамов, М.Ю. Катаев // Доклады ТУСУРа. – 2014. – № 4(34). – С. 114–119.

Катаев Михаил Юрьевич

Д-р техн. наук, профессор каф. автоматизированных систем управления (АСУ) ТУСУРа, профессор Юргинского технологического института (филиала) Национального исследовательского Томского политехнического университета
Тел.: +7-960-975-27-85, +7-(382-2) 70-15-36
Эл. почта: kataev.m@sibmail.com

Катаева Надежда Григорьевна

Д-р мед. наук, профессор каф. неврологии и нейрохирургии Сибирского государственного медицинского университета
Тел.: +7-(382-2) 53-04-23
Эл. почта: nadi-51@yandex.ru

Коробко Андрей Петрович

Сотрудник ООО «СТС», г. Томск
Тел.: +7-983-348-01-02
Эл. почта: Andrew.p.korobko@gmail.com, Duhmaster@3dbin.com

Шаймарданов Тимур Маратович

Студент каф. АСУ ТУСУРа
Тел.: +7-913-119-82-99
Эл. почта: shaymardanov.timur@gmail.com

Kataev M.Yu., Kataeva N.G.,
Korobko A.P., Shaymardanov T.M.

Methodology to build a frontal skeletal model of a human figure during walking using images

The purpose of the work is to develop the methods and algorithms for building the human frontal skeleton model, in the process of walking, using the sequence of images. An overview of the methods used to analyze the human gait and the building of various types of skeleton models is presented. Based on the images obtained, a skeleton model of a human being is constructed.

Keywords: image, human figure, frontal direction, skeleton model.

УДК 621.805.08: 004.021

А.Н. Горитов, М.Ф. Молокова

Расчёт динамических характеристик манипулятора

Проектирование роботов, решение задач управления манипулятором, анализ кинематической структуры приводят к необходимости изучения динамических процессов, происходящих во время функционирования робота. В статье рассмотрена модификация системы моделирования РАУМС. Модификация системы позволяет выполнять расчёты динамических характеристик исследуемых объектов, а также включает в себя модификацию модели компонентов и внедрение в систему блока по расчёту динамических характеристик манипулятора. Реализованный алгоритм основан на методе Лагранжа–Эйлера и позволяет решать прямую и обратную задачу динамики. Результат выполнения расчётов представлен в виде таблицы и графика изменения динамических характеристик в момент времени. В результате разработки модуля были расширены возможности моделирования в плане анализа динамических характеристик робота.

Ключевые слова: робот-манипулятор, прямая задача динамики, обратная задача динамики, метод Лагранжа–Эйлера, система РАУМС.

doi: 10.21293/1818-0442-2017-20-4-113-116

Современные роботы – это сложные устройства, сочетающие в себе точную механику, электроприводную технику и цифровое управление [1].

Большое разнообразие возможных конструкций роботов-манипуляторов и сложность их математического описания придают особую актуальность проблеме моделирования функционирования роботов (имитационное моделирование) при выполнении заданных операций. Потребности в моделировании возникают как на этапе проектирования, так и при создании и эксплуатации этих устройств.

Проведенный системный анализ проблемы моделирования позволяет выявить цель, направления, задания и задачи, подлежащие исследованию [2].

Одной из важных задач, выделенных на основе системного анализа, является анализ динамических характеристик функционирования робота-манипулятора. Изучение динамических процессов в приводах робота позволяет определить динамические нагрузки, воздействующие на звенья кинематической цепи в процессе их перемещения [3]. После этого при реализации заданных движений манипулятора можно определить усилия в приводах, это позволяет провести расчёты и выбрать необходимые приводы.

При динамическом анализе роботов рассматривают два класса задач: динамический анализ движения и динамический силовой анализ [4, 5]. При решении первой задачи вычисляются ускорения и силы реакций по заданным внешним силам и моментам двигателей. После этого путем интегрирования ускорения вычисляются скорости и ускорения. Во второй задаче задаётся необходимое движение робота, а затем находятся неизвестные силы, обеспечивающие необходимое перемещение.

При работе в системе проектирования РАУМС (расчёт и анализ управляемых механических систем) [6] возникла необходимость реализации задачи динамики. Особенностью РАУМС в отличие от других программ является возможность выполнения задач, учитывая рабочую среду, в которой проводятся исследования основного объекта.

Цель работы – разработать алгоритмы формирования и решения систем уравнений, позволяющих решить прямую и обратную задачу динамики манипулятора.

Прямая задача динамики

В робототехнике предложено несколько методов математического описания движения роботов. Эти методы основаны на использовании классических принципов и уравнений механики: Лагранжа–Эйлера [7, 8], Ньютона–Эйлера [9], Гаусса [10]. Метод Лагранжа–Эйлера позволяет получить удобную для анализа форму уравнений движения. Метод Ньютона–Эйлера не подходит для решения поставленной задачи в связи с большим объемом вычислений, связанным с необходимостью вычисления матрицы вторых производных. Метод Гаусса является итерационным методом решения получаемых линейных уравнений. По числу арифметических операций этот метод нельзя назвать экономным. Так как для нас важна не только точность решения, но и время расчётов и форма уравнения, то для расчётов использовался метод Лагранжа–Эйлера.

Запишем уравнение Лагранжа–Эйлера для поиска динамических характеристик (1):

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right] - \frac{\partial L}{\partial q_i} = \tau_i. \quad (1)$$

В уравнении (1) L – функция Лагранжа, $L = K - P$, K – полная кинетическая энергия манипулятора, P – полная потенциальная энергия манипулятора, q_i – обобщённые переменные манипулятора, \dot{q}_i – первая производная по времени обобщённых переменных, τ_i – обобщённые силы или моменты, создаваемые в i сочленении для реализации заданного движения i -го звена.

Уравнение (2) описывает динамику движения робота в векторном виде:

$$\tau_i = \sum_{k=1}^n D_{i,k} \ddot{q}(t)_k + \sum_{k=1}^n \sum_{m=1}^n h_{i,k,m} \dot{q}(t)_k \dot{q}(t)_m - c_i, \quad (2)$$

где τ_i – обобщённые силы в i -м сочленении для реализации движения i -го звена, $D_{i,k}$ определяется формулой (3), устанавливает связь сил и моментов которые действуют в сочленениях с ускорениями присоединённых переменных, $h_{i,k,m}$ – определяется равенством (4) и (5), устанавливает связь сил и моментов, которые действуют в сочленениях со скоростями изменения присоединённых переменных, c_i определяется равенством (6), вычисляет силу тяжести, воздействующую на звенья манипулятора, $\ddot{q}(t)_k$ – обобщённое ускорение, $\dot{q}(t)_m$ – обобщённая скорость, n – количество звеньев робота-манипулятора.

Коэффициенты D_{ik} определяются равенством

$$D_{ik} = \sum_{j=\max(i,k)}^n Tr(\mathbf{U}_{jk} \mathbf{U}_j \mathbf{U}_{ji}^T), \quad i, k = 1, 2, \dots, n. \quad (3)$$

Коэффициенты h_{ikj} определяются равенством

$$h_{ikj} = \sum_{j=\max(i,k,m)}^n Tr(\mathbf{U}_{jkm} \mathbf{J}_j \mathbf{U}_{ji}^T), \quad i, k, m = 1, 2, \dots, n, \quad (4)$$

$$h_i = \sum_{k=1}^n \sum_{m=1}^n h_{ikm} \dot{q}_k(t) \dot{q}_m(t) \quad i=1, 2, \dots, n, \quad (5)$$

где \mathbf{U}_{ji}^j – матрица, описывает изменения положения i -го звена, возникающие при движении в j -м сочленении манипулятора; \mathbf{J}_j – матрица моментов инерции j -го звена; Tr – след полученной матрицы. Коэффициенты c_i определяются равенством

$$c_i = \sum_{j=i}^n (-m_j g \mathbf{U}_{ji}^j \mathbf{r}_j) \quad i=1, \dots, n, \quad (6)$$

где m_j – масса j -го звена; \mathbf{U}_{ji}^j – матрица описывает изменения положения i звена, возникающие при движении в j сочленении манипулятора; \mathbf{r}_j – вектор центра масс i звена в собственной системе отсчёта, g – сила тяжести [7].

Обратная задача динамики

Для решения обратной задачи динамики уравнение (2) примет следующий вид:

$$\ddot{q}(t)_i = \frac{(\tau_i - \sum_{k=1}^n \sum_{m=1}^n h_{ikm} \dot{q}_k \dot{q}_m - c_i)}{\sum_{k=1}^n D_{i,k}}, \quad i = \overline{1, n}. \quad (7)$$

Значения обобщённой переменной и её производной вычисляются следующим образом:

$$\dot{q}(t + \Delta t)_i = \dot{q}(t)_i + \ddot{q}(t)_i \cdot \Delta t, \quad i = \overline{1, n}, \quad (8)$$

$$q(t + \Delta t)_i = q(t)_i + \dot{q}(t)_i \cdot \Delta t, \quad i = \overline{1, n}, \quad (9)$$

где Δt – изменение времени.

Общий алгоритм решения прямой и обратной задачи динамики изображён на рис. 1.

Более подробный алгоритм нахождения обобщённых сил изображён на рис. 2.

Более подробный алгоритм определения характера движения для звеньев изображён на рис. 3.

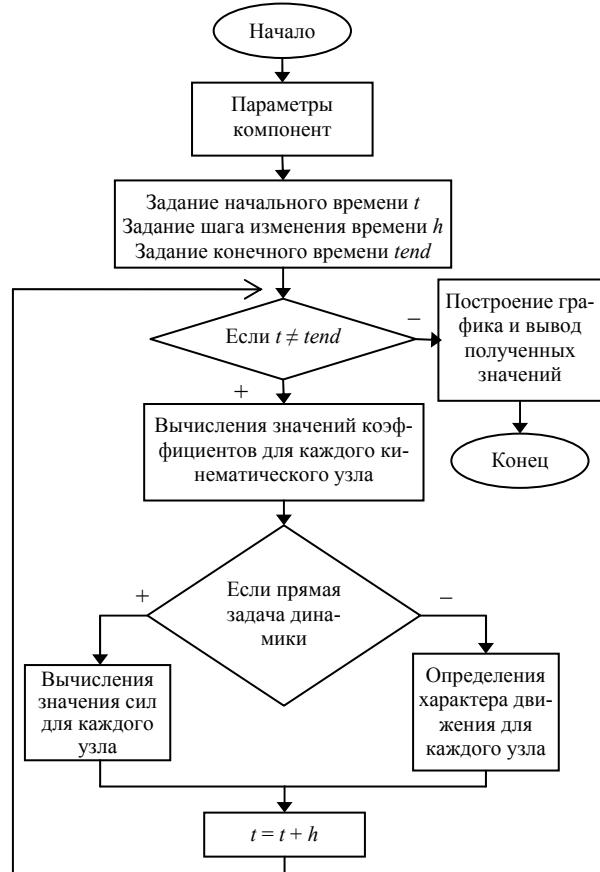


Рис. 1. Общий алгоритм решения задачи динамики



Рис. 2. Алгоритм нахождения сил и моментов

Описание исследуемого объекта в системе РАУМС строится на основе его компонентного представления. Формирование уравнения Лагранжа–Эйлера потребовало модификации программных модулей. Они были дополнены блоками формирования матрицы инерции, разработаны модели компонентов – силы и моменты силы. Для включения в систему моделирования разработанные модели были преобразованы в соответствии с общей структурой модели компонента [11]. Кроме того разработано два новых модуля: один, отвечающий за решения прямой задачи динамики, и второй, отвечающий за решение обратной задачи динамики. Результаты выполненных расчётов выводятся в виде таблицы и в виде графика.



Рис. 3. Алгоритм определения характера движения звеньев

Заключение

На основе метода Лагранжа–Эйлера разработан алгоритм формирования уравнений Лагранжа–Эйлера для произвольного манипулятора. Реализован метод решения уравнения Лагранжа–Эйлера в рамках системы РАУМС. Это позволяет анализировать динамические характеристики манипулятора с учетом объектов внешней среды.

Выполнена модификация модулей системы РАУМС для того, чтобы обеспечить формирование и решение уравнения Лагранжа–Эйлера.

Разработанный модуль позволяет для произвольного робота манипулятора автоматически составлять уравнения и решать как прямую, так и обратную задачу динамики; находить обобщённые силы, которые необходимо задать для перемещения звеньев манипулятора по заданной траектории при решении прямой задачи динамики; вычислить траекторию движения, скорость и ускорения каждого звена манипулятора при решении обратной задачи динамики.

Литература

1. Кориков А.М. О развитии понятия «мехатроника» // Доклады ТУСУРа. – 2010. – Т. 1(21), № 2. – С. 199–202.
2. Горитов А.Н. Моделирование адаптивных мехатронных систем / А.Н. Горитов, А.М. Кориков. – Томск: В-Спектр, 2007. – 292 с.
3. Булгаков А.Г. Промышленные роботы. Кинематика, динамика, контроль и управление. Сер.: Библиотека инженера / А.Г. Булгаков, В.А. Воробьев. – М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2007. – 488 с.
4. Sam-Sang You. Dynamics and controls for robot manipulators with open and closed kinematic chain mechanisms. – Iowa State University, 1994. – 157 p.
5. Юревич Е.И. Основы робототехники. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 416 с.
6. Горитов А.Н. Моделирование манипуляционных робототехнических систем в условиях неполной информации о внешней среде. – Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2005. – 276 с.
7. X.-J. Liu. Kinematics, Dynamics and Dimensional Synthesis of a Novel 2-DoF Translational Manipulator / X.-J. Liu, Q.-M. Wang, J. Wang // Journal of Intelligent and Robotic Systems. – 2004. – Vol. 41, No. 4. – P. 205–224.
8. Da-quan Li. Dynamics Modeling, Control System Design and Simulation of Manipulator Based on Lagrange Equation / Da-quan Li, Hua-jie Hong and Xian-liang Jiang // Mechanism and Machine Science. – 2016. – P. 1129–1141.
9. Фу К. Робототехника / К. Фу, Р. Гонсалис, К. Ли. – М.: Мир, 1989. – 624 с.
10. Фролова К.В. Механика промышленных роботов: учеб. пособие для вузов: в 3 кн. – Кн. 1: Кинематика и динамика. – М.: Высш. шк., 1988. – 304 с.
11. Горитов А.Н. Структура модели компонента системы автоматизированного моделирования робототехнических комплексов // Программные продукты и системы: Приложение к журналу «Проблемы теории и практики управления». – 2001. – № 2. – С. 20–22.

Горитов Александр Николаевич

Д-р техн. наук, профессор каф. автоматизированной системы управления (АСУ) ТУСУРа
Тел.: +7 (382-2) 70-15-36
Эл. почта: ang@asu.tusur.ru

Молокова Мария Федоровна

Магистрант каф. АСУ ТУСУРа
Тел.: +7-913-852-24-07
Эл. почта: masha_molokova@mail.ru

Goritov A.N., Molokova M.F.

Calculation of the dynamic characteristics of the manipulator

Designing robots, solving manipulator control problems, analyzing the kinematic structure leads to the need to study the dynamic processes that occur during the operation of the robot. In the report, the modification of the RAUMS simulation system is considered. Modification of the system allows performing calculations of the dynamic characteristics of the objects under study. It also includes the modification of the component model and the integration into the system of the

unit for calculating the dynamic characteristics of the manipulator. The implemented algorithm is based on the Lagrange–Euler method and allows solving the direct and inverse problem of dynamics. The result of the calculations is presented in a table and a graph of the change in the dynamic characteristics at the time. As a result of the development of the module, the modeling capabilities were expanded, in terms of analysis of the dynamic characteristics of the robot.

Keywords: Robot - manipulator, direct problem of dynamics, inverse dynamic problem, Lagrange–Euler method, RAUMS system.

УДК 004.021:681.5

А.Н. Горитов

Построение трехмерной модели рабочего пространства промышленного робота

Предложено решение задачи формирования модели рабочего пространства промышленного робота на основе использования стереозрения. Приведена последовательность обработки изображения. Выделены шаги предварительной обработки изображения и формирования трехмерной модели рабочего пространства промышленного робота. Рассмотрены основные этапы обработки изображения. Приведен пример обработки изображений стереопары с целью получения трехмерной модели рабочего пространства промышленного робота.

Ключевые слова: промышленная робототехника, цифровая обработка изображений, стереозрение, стереопара, рабочее пространство.

doi: 10.21293/1818-0442-2017-20-4-117-121

Усложнение технологических операций, работа в ограниченном пространстве приводят к необходимости планирования перемещений каждого звена промышленного робота (ПР) с учетом имеющихся пространственных ограничений. Современные адаптивные ПР, имеющие возможность использовать различные типы датчиков, могут самостоятельно выполнять планирование траектории рабочего инструмента ПР [1]. Это обеспечивается специализированным модулем системы управления, отвечающим за планирование траектории. Основой построения плана траектории является модель рабочего пространства ПР.

Увеличение скорости перемещения объектов в рабочем пространстве приводит к тому, что время работы уже используемых систем формирования модели рабочего пространства часто соизмеримо, а иногда и превышает время выполнения технологической операции. Кроме того, в настоящее время возникает необходимость оперировать с объектами, положение которых определяется не только положением на плоскости стола, но и в пространстве, что затрудняет формирование модели рабочего пространства. Это приводит к необходимости поиска новых, более эффективных методов формирования модели рабочего пространства ПР.

Решение этой задачи может основываться на различных методах и алгоритмах, каждый из которых имеет свои достоинства и недостатки. Рассмотрим один из подходов к ее решению.

Пусть рабочее пространство ПР содержит рабочие объекты в форме цилиндров и параллелепипедов. Для формирования модели рабочего пространства необходимо найти все объекты, которые имеются на рабочем пространстве, определить их геометрические характеристики и пространственное положение.

Существуют различные типы датчиков, позволяющие получить информацию о внешней среде. Одним из перспективных направлений получения информации о внешней среде являются видеокамеры. Видеокамеры различных типов уже широко используются для создания систем технического зрения (СТЗ) [2, 3].

Для построения модели рабочего пространства ПР будет использоваться стереоскопическая система, состоящая из двух видеокамер, расположенных над рабочем пространством ПР [4]. Геометрия стереоскопической системы приведена на рис. 1.

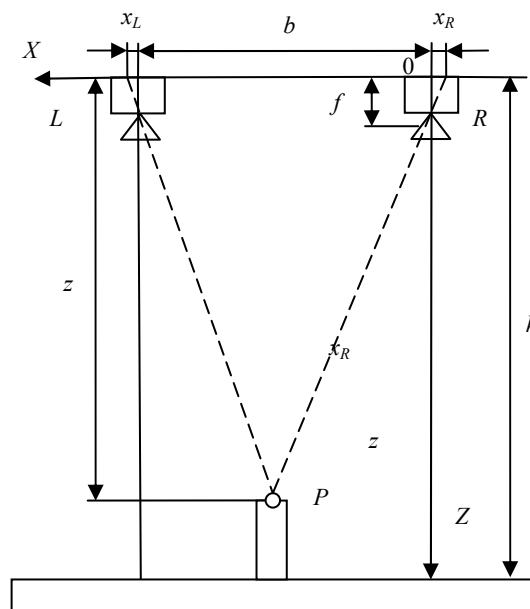


Рис. 1. Геометрия стереоскопической системы

Здесь L и R – левая и правая камеры стереосистемы; b – база стереосистемы; P – некоторый объект, расположенный на рабочем пространстве (см. рис. 1).

Технические ограничения видеокамер и сложности, связанные с освещенностью рабочего пространства, приводят к появлению на изображениях «шума», теней, бликов и т.д. Эти недостатки не позволяют непосредственно использовать полученные изображения для решения основной задачи – построения трехмерной модели рабочего пространства ПР. Над полученными изображениями необходимо выполнить предварительную обработку. Поэтому решение задачи включает в себя два этапа. На первом этапе выполняется предварительная обработка изображения. На втором – формирование модели рабочего пространства.

Предварительная обработка изображений стереопары включает в себя следующие шаги:

1. Получить исходное изображение.
2. Преобразовать в полутоновое изображение.
3. Провести сегментацию изображения.
4. Выполнить размытие изображения.
5. Выделить границы.

Рассмотрим более подробно последовательность предварительной обработки изображения.

1. Получить исходное изображение. В настоящее время выпускается большая номенклатура видеокамер. В зависимости от используемых видеокамер для получения изображения может потребоваться различное специализированное и программное обеспечение. В настоящее время широко распространение получили USB-камеры. К достоинствам этих камер относится то, что для использования этих камер не требуется дополнительного аппаратного обеспечения. К недостаткам относится то, что они обладают невысокими техническими характеристиками. Это может привести к необходимости создания дополнительных средств обработки изображения.

2. Преобразовать в полутоновое изображение. Многие видеокамеры выдают цветное изображение в формате RGB. Преобразование цветного изображения в полутоновое выполняется по формуле [4]

$$y = 0,3 \cdot r + 0,59 \cdot g + 0,11 \cdot b,$$

где r , g , b – цветовые компоненты исходного изображения, а y – выходное значение для пикселя изображения в оттенках серого.

3. Провести сегментацию изображения. Сегментация изображения подразумевает разбиение изображения на множество его областей, для того чтобы можно было работать с объектами отдельно. Сегментация изображения выполнялась с помощью алгоритма Mean Shift [5]. Алгоритм Mean Shift относится к классу алгоритмов автоматической сегментации. С помощью этого алгоритма изображение разбивается на однородные области без использования априорной информации об изображении. В силу этого свойства алгоритм находит широкое применение в компьютерном зрении при распознавании изображений.

4. Выполнить размытие изображения. В связи с тем, что алгоритмы выделения границ чувствительны к наличию «шума» на изображении, на этом шаге алгоритма выполняется размытие изображения с помощью фильтра Гаусса [4].

5. Выделить границы. Выделения границ выполняется методом Кэнни [6]. Этот метод зарекомендовал себя как эффективный алгоритм выделения границ. В этом методе выполняется многошаговая обработка изображения, которая включает сглаживание обрабатываемого изображения, поиск границ на основе градиентного метода, удаление ложных максимумов и формирование контуров.

В результате выполнения предварительного этапа каждое изображение стереопары содержит бинарное изображение с выделенными границами

всех объектов, находящихся на изображении рабочего пространства ПР [7].

Преобразованные изображения стереопары передаются на второй этап обработки.

Второй этап включает в себя определение положения объектов на рабочем пространстве и их геометрических характеристик. Второй этап включает в себя следующие шаги:

1. Получить стереопару, обработанную на предварительном этапе (с выделенными границами объектов, присутствующих на изображениях стереопары).

2. Выделить объекты, присутствующие на рабочем пространстве.

3. Определить положение выделенных объектов на рабочем пространстве ПР и высоту выделенных объектов.

4. Сохранить сформированную модель рабочего пространства.

Для определения положения объектов в плоскости XOY необходимо определить, сколько миллиметров приходится на один пиксель изображения. Для этого воспользуемся метками, предварительно размещенными на основании рабочего пространства ПР (на плоскости XOY). Обозначим метки как $M_1(x_1, y_1)$, $M_2(x_2, y_1)$, $M_3(x_1, y_2)$. Тогда на один пиксель по оси OX будет приходиться

$$h_x = (x_2 - x_1) / (p(x_2, y_1) - p(x_1, y_1))$$

миллиметров на пиксель и по оси OY

$$h_y = (y_2 - y_1) / (p(x_1, y_2) - p(x_1, y_1))$$

миллиметров на пиксель. Здесь $x_2 - x_1$ – расстояние между метками M_1 и M_2 по оси OX , $y_2 - y_1$ – расстояние между метками M_1 и M_2 по оси OY , $p(x_2, y_1) - p(x_1, y_1)$ – число пикселей, находящихся на изображении между метками M_1 и M_2 по оси OX , $p(x_1, y_2) - p(x_1, y_1)$ – число пикселей, находящихся на изображении между метками M_1 и M_2 по оси OY .

Полученные величины позволяют рассчитывать положение координаты точек объектов рабочего пространства ПР в плоскости XOY .

Для определения третьей координаты произвольной точки объекта воспользуемся изображениями, составляющими стереопару.

Пусть x_L и x_R – координаты точки P по оси x на передней плоскости изображения (см. рис. 1). Для решения задачи необходимо найти z – расстояние до объекта.

Учитывая, что в стереосистеме видеокамеры устанавливаются так, что на двух изображениях координата y будет совпадать ($y_L = y_R$), то координаты произвольной точки можно определить с помощью следующих уравнений [4]:

$$x = \frac{x_L \cdot z}{f}, \quad y = \frac{y_L \cdot z}{f} = \frac{y_R \cdot z}{f}, \quad z = \frac{f \cdot b}{x_L - x_R}.$$

Здесь x_L – смещение точки p по оси OX относительно центра левой видеокамеры, x_R – смещение

точки p по оси OX относительно центра правой видеокамеры. Приведенные выражения позволяют определить координаты точки P .

Разность величин x_L и x_R называется рассогласованием [4]. Обозначим величину рассогласования как d . Величина рассогласования d показывает, насколько нужно сместить точку $p(x_L, y)$ по оси OX на изображении, полученном с помощью левой видеокамеры, так чтобы она совпала с точкой $p(x_R, y)$ на изображении, полученном с помощью правой видеокамеры. С увеличением расстояния до точки $p(x, y, z)$ величина рассогласования уменьшается и будет равна нулю для бесконечно удаленных объектов.

В соответствии с введенным обозначением последнее уравнение примет вид:

$$z = \frac{f \cdot b}{d}. \quad (1)$$

Таким образом, чтобы найти расстояние до точки P , необходимо знать базу стереосистемы b , фокусное расстояние камер f и величину рассогласования d .

Для определения величины рассогласования разработан ряд алгоритмов, которые принято разделять на две группы [8]. В первую группу входят алгоритмы, подсчитывающие величину рассогласования для каждого пикселя, используя информацию из окна заданного размера. Во вторую группу входят алгоритмы, основанные на применении преобразования сразу ко всему изображению. Алгоритмы первой группы принято называть локальными, а алгоритмы второй группы – глобальными алгоритмами.

Локальные алгоритмы подсчитывают рассогласование для каждого пикселя по отдельности. Для этого используется окно фиксированного или переменного размера. На результаты работы локальных алгоритмов, т.е. на точность определения величины рассогласования, большое влияние оказывает наличие «шумов», бликов на изображении и т.д., которые могут присутствовать на изображении.

Алгоритмы второй группы позволяют получить карту рассогласования для всего изображения. Глобальные алгоритмы для построения карт рассогласования основаны на применении преобразования ко всему изображению сразу в отличие от локальных алгоритмов. Большинство алгоритмов этой группы построения карты рассогласования строится на поиске минимума функционала энергии. Наиболее известными алгоритмами этой группы являются:

- алгоритм разрезания графов (GC) [9–11],
- алгоритм распространения доверия (BP) [12],
- глобальный алгоритм, основанный на методе динамического программирования (DP) [13].

Глобальные алгоритмы на выходе формируют лучшие результаты по сравнению с локальными. Они имеют крайне низкие ошибки определения рассогласования. Основным недостатком этих методов являются высокие вычислительные затраты.

В 2005 г. в работе [14] был предложен алгоритм SGM (Semi-Global Matching). Предложенный алгоритм дает более точные результаты по сравнению с

локальными алгоритмами и, что очень важно, позволяет получить результаты за приемлемое время. К сожалению, на основе численных экспериментов установлено, что из-за особенностей используемых видеокамер расстояние до объектов определялось некорректно и приводило к большим погрешностям.

В связи с тем, что локальные алгоритмы имеют большую потерю точности при измерении расстояния, а глобальные алгоритмы имеют высокие вычислительные затраты, для решения задачи нахождения рассогласования был реализован следующий алгоритм:

1. Выполнить предварительную обработку изображений стереопары, которая включает преобразование в черно-белое, фильтрацию изображения и выделение границ.

2. Для каждого изображения стереопары с помощью преобразования Хафа [15] выделить параметрически заданные объекты (окружности, прямоугольники).

3. Для каждого изображения стереопары сформировать список выделенных объектов. Для каждого выделенного объекта сохраняются информация о положении объекта на рабочем пространстве и геометрические параметры.

4. Каждый список отсортировать по положению объектов на рабочем пространстве (сначала по оси OX , затем по оси OY) и по геометрическим параметрам.

5. В отсортированных списках найти записи, соответствующие изображению одного и того же объекта рабочего пространства на разных снимках стереопары.

6. С учетом того, что изображения стереопары ректифицированы, величина рассогласования d для выделенного объекта определяется как разность координат:

$$d = x'_L - x'_R,$$

где x'_L , x'_R – координаты по оси OX на снимках левой и правой камер стереоскопической системы.

7. С помощью вычисленной величины рассогласования определить по формуле (1) расстояние до точки p . Зная расстояние h до стола рабочего пространства ПР вычисляется высота выделенного объекта:

$$h_p = h - z.$$

8. Если в списках остались еще объекты, для которых не определена высота объекта, пункты 5–7 повторяются.

Предложенный алгоритм обеспечивает более высокую точность определения рассогласования по сравнению с локальными алгоритмами за счет большей устойчивости преобразования Хафа к случайным помехам в отдельных пикселях изображения. В то же время он обладает меньшими ресурсными требованиями по сравнению с глобальными алгоритмами.

Для тестирования предложенного решения задачи сформированная модель рабочего пространства сохраняется в файле и затем отображается графическими средствами на экране монитора.

Результаты экспериментов

Для оценки эффективности предложенного метода была написана программа на языке программирования C++, используя библиотеку технического зрения OpenCV [16].

Для построения системы стереоскопического зрения были использованы две камеры DEXP-V300 (рис. 2). Технические характеристики приведены в таблице.



Рис. 2. Камера DEXP-V300

Характеристика DEXP V-300

Характеристики	Параметры
Число мегапикселей матрицы	0,3 МП
Разрешение видео	640×480
Максимальная частота кадров	30 fps
Фокусировка	Ручная
Фокусное расстояние	Неизвестно

Для проведения экспериментов систему стереоскопического зрения необходимо откалибровать с тем, чтобы получить оценки параметров камер, устранить оптические искажения и произвести ректификацию. Калибровка необходима для вычисления внутренних характеристик камер, положения камер относительно друг друга, получения матриц поворота и самое главное – матрицы для приведения изображений к ректифицированному виду.

Калибровка камер обычно выполняется за счет многократной съемки некоторого калибровочного шаблона, на изображении которого можно легко выделить ключевые точки, для которых известны их относительные положения в пространстве. Далее составляются и решаются системы уравнений, связывающие координаты проекций, матрицы камер и положения точек шаблона в пространстве. Без проведения калибровки работа с распознаванием дистанции невозможна. Для калибровки камер была использована библиотека технического зрения OpenCV [16].

В результате проведения калибровки были оценены внутренние характеристики камер:

$$A_1 = \begin{pmatrix} 905,141 & 0 & 361,872 & 0 \\ 0 & 905,141 & 240,618 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix},$$

$$A_2 = \begin{pmatrix} 905,141 & 0 & 361,872 & -8716,61 \\ 0 & 905,141 & 240,618 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Отсюда можно заметить, что камеры действительно одинаковые, так как параметры этих камер совпадают.

В процессе калибровки также получены матрицы поворота камер, необходимые для ректификации:

$$R_L = \begin{pmatrix} 0,99915 & -0,00143 & -0,0411 \\ 0,00134 & 0,99999 & -0,0023 \\ 0,04110 & 0,00228 & 0,99915 \end{pmatrix},$$

$$R_R = \begin{pmatrix} 0,99887 & -0,02985 & -0,03694 \\ 0,02993 & 0,99955 & 0,001765 \\ 0,036871 & -0,00286 & 0,999315 \end{pmatrix}.$$

Матрица поворота из системы координат левой камеры в правую:

$$R = \begin{pmatrix} 0,99958 & 0,02858 & -0,00428 \\ -0,02860 & 0,99958 & -0,003984 \\ 0,00416 & 0,00410 & 0,999982 \end{pmatrix}.$$

Получив оценки параметров камер системы стереоскопического зрения, можно приступить к формированию трехмерной модели внешней среды.

На вход программе обработки изображений подаются два исходных изображения рис. 3 (для левой и правой камеры соответственно).



Рис. 3. Исходные изображения рабочей сцены с камер: а – для левой камеры; б – для правой камеры

После того как снимки были получены, для каждого изображения выполняется метод классификации и выделения объектов. На рис. 4 приведены результаты работы алгоритма классификации и выделения объектов.



Рис. 4. Результат классификации и выделения объектов: а – для левой камеры; б – для правой камеры

Для вычисления расстояния до объектов выполняется разработанный алгоритм вычисления рас согласования. Зная расстояние до рабочей сцены (650 мм), типы и высоты объектов, строится топологическая модель рабочей сцены.

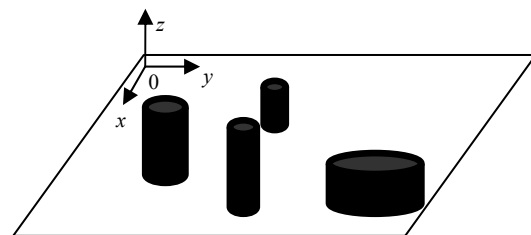


Рис. 5. Трехмерная модель рабочей сцены

Полученная трехмерная модель рабочей сцены приведена на рис. 5. Для визуализации построенной трехмерной модели рабочей сцены использован графический редактор MeshLab [17].

Заключение

В работе предлагается метод построения трехмерной модели рабочего пространства промышленного робота. Формирование модели рабочего пространства строится на основе стереоскопической системы. Предложенный метод позволяет для заданного множества объектов манипулирования снизить вычислительные затраты на построение модели рабочего пространства, что важно для повышения быстродействия системы технического зрения.

Кроме того, предложенный метод устойчиво работает при наличии теней у объектов на рабочем пространстве, шумов и разрывов контуров на изображении. Это позволяет использовать для получения изображения видеокамеры с невысокими техническими характеристиками.

Литература

1. Воронников С.А. Информационные устройства робототехнических систем: учеб. пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 384 с.
2. Письменный Г.В. Системы технического зрения в робототехнике / Г.В. Письменный, Б.Б. Михайлов, А.Ю. Корнеев. – М.: Машиностроение, 1991. – 88 с.
3. Клевалин В.А. Системы технического зрения в промышленной робототехнике / В.А. Клевалин, А.Ю. Поливанов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2010. – № 9. – С. 26–36.
4. Шапиро Л. Компьютерное зрение / Л. Шапиро, Дж. Стокман. – М.: Бином. Лаборатория знаний, 2006. – 752 с.
5. Comaniciu D. Mean shift: A robust approach toward feature space analysis / D. Comaniciu, P. Meer // IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2002. – Vol. 24, № 5. – P. 603–619.
6. Canny J. A computational approach to edge detection // IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1986. – Vol. 8, № 6. – P. 679–714.
7. Горитов А.Н. Выделение на изображении низкого разрешения параметрически задаваемых объектов / А.Н. Горитов, С.И. Яковченко // Доклады ТУСУРа. – 2017. – Т. 20, № 2. – С. 88–90.
8. Scharstein D. A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms / D. Scharstein, R. Szeliski // International Journal of Computer Vision. – 2002. – Vol. 47, № 1. – P. 7–42.
9. Kolmogorov V. Computing visual correspondence with occlusions using graph cuts / V. Kolmogorov, R. Zabih // International Conference on Computer Vision. – 2001. – Vol. 2. – P. 508–515.
10. Boykov Y. Fast approximate energy minimization via graph cuts / Y. Boykov, O. Veksler, R. Zabih // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2001. – Vol. 23, № 11. – P. 1222–1239.
11. Li Hong Chen G. Segment-based stereo matching using graph cuts // Computer Vision and Pattern Recognition. – 2004. – Vol. 1. – P. 74–81.
12. Klaus A. Segment-Based Stereo Matching Using Belief Propagation and a Self-Adapting Dissimilarity Measure / A. Klaus, M. Sormann, K. Karner // Proceedings of the 18th International Conference on Pattern Recognition. – 2006. – Vol. 3. – P. 15–18.
13. Bobick A.F. Large occlusion stereo / A.F. Bobick, S.S. Intille // International Journal of Computer Vision. – 1999. – Vol. 33(3). – P. 181–200.
14. Hirschmuller H. Accurate and efficient stereo processing by semi-global matching and mutual information // IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – 2005. – Vol. 2. – P. 807–814.
15. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.
16. OpenCV [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://opencv.org> (дата обращения: 01.11.2017).
17. MeshLab [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.meshlab.net/> (дата обращения: 01.11.2017).

Горитов Александр Николаевич

Д-р техн. наук, профессор
каф. автоматизированной системы управления ТУСУРа
Тел.: +7 (382-2) 70-15-36
Эл. почта: ang@asu.tusur.ru

Goritov A.N.

Building a three-dimensional model of the workspace of an industrial robot

The solution for the problem of forming a model of the workspace of an industrial robot using stereovideo is proposed. The sequence of the image processing is described. The steps for image pre-processing and shaping a three-dimensional model of the workspace for an industrial robot are highlighted. The basic stages of image processing are investigated. An example of stereo pair imaging with the goal to obtain a three-dimensional model of the workspace of an industrial robot is given.

Keywords: Industrial robotics, digital image processing, stereovision, stereo, workspace.

UDC 004.94

M.I. Kochergin

Interpretation of the statechart diagram into a multilevel simulation language

The paper deals with the matters of simulating physics-and-technics hybrid systems in the multilevel modeling environment MARS. This study gives a comparison of a straight algorithmic approach suggested by the language of modeling algorithmic constructions (MAC-language) of MARS and using statecharts for modeling hybrid systems. This paper gives the rationale for interpretation of the statechart diagram into MAC-language of MARS and describes the component «State» developed for modeling discrete dynamic behavior of a system in MARS.

Keywords: discrete-continuous dynamic system, hybrid system, computer modeling, simulation, statechart, finite-state machine.

doi: 10.21293/1818-0442-2017-20-4-122-125

To qualitatively describe a large class of practical problems, it is necessary to take into account not only continuous but also discrete behavior of systems. Systems that have both continuous behavior (for example, physical and chemical behavior) and discrete (logical) behavior that determines the algorithm of the system's activity are called *discrete event dynamic systems* (DEDS) or *hybrid systems* (HS). Such systems are also called *discrete continuous systems*, *variable structure systems*, *event-driven systems*, etc. A system may have the behavior of both types simultaneously because of the following main factors: 1) co-operation of continuous and discrete objects, 2) instant qualitative changes in the continuous object, 3) changing the composition of the system [1]. Various approaches can be used to describe a hybrid system: by finite-state machine, Petri net, state diagram (UML), statecharts of D. Harel.

To model hybrid systems, various special instrumental tools can be used: the simulation environments (AnyLogic, Arena) or the modeling environments (Simulink, Rand Model Designer). Software of both types is not suitable for modeling physics-and-technics systems, since software of the first type do not allow creating models of continuous behavior of the required level of abstraction, and software of the second type allow integrating into the state diagrams only continuous models written in explicit form (in the form of a program code). The modeling environment MARS [2] is based on the method of component circuits [3] and uses multilevel approach [4] for modeling systems of different nature. MARS combines simulation and analytical modeling methods. Algebraic and differential equations describing a continuous model in MARS can be written in an implicit form. At the moment MARS uses straight algorithmic approach to represent discrete behavior of systems which was suggested in the language of modeling algorithmic constructions (MAC-language) [5]. In turn, this leads to increasing the complexity of the model and decreasing its readability. In this regard, an essential task is integrating new tools into the MAC-language for effective and easy constructing models of DEDS in MARS.

Multilevel approach to modeling in MARS

MARS uses the technology of visual modeling which allows the user to compile a model from the existing typical components of the component model library (CML) and to develop the missing ones using component model generator (CMG) [6]. The cumulative equations system of the constructed multicomponent system is automatically formed and transmitted to the «solver» for the numerical solution. The results of the numerical solution are visualized to the user. MARS uses different visual languages to model discrete, continuous and visual behavior of systems and objects. In the multi-level representation of the model each language corresponds to its level which has its own layer (separate window) in the MARS model editor (Fig. 1). This approach assumes decomposition of an object's computer model into 3 levels: the object scheme level (corresponding to physical and chemical representation of an object's continuous behavior, which is described by means of mathematical modeling), algorithmic level (corresponding to the discrete-event representation of an object's behavior, which is described by the means of simulation) and visual level (corresponding to the external representation of an object's activity and to the user interface). All three levels are displayed in the respective layers of the MARS model editor [8] (Fig. 1).

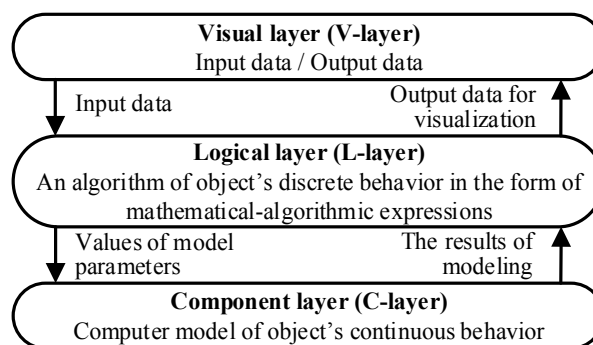


Fig. 1. Structure of computer models multilevel representation

Visual layer (the V-layer) is a user interface designed for data input and output in the form of graphs,

diagrams or graphic animation. The V-layer is directly intended for controlling the working process of a computer model.

Component layer (the C-layer) contains a mathematical model of a system or an object in the form of component circuits (CC) describing its continuous (physical-chemical) behavior in the form of algebraic-differential equations.

Logical layer (the L-layer) carries out data transfer between the C-layer and the V-layer. Also the L-layer contains an algorithmic CC written in the MAC-language and which defines the algorithm for the discrete (logical) behavior of an object or for an experiment scenario. Thus, an object's continuous behavior described on the C-layer can be supplemented by the discrete-event behavior described on the L-layer.

Language of modeling algorithmic constructions (MAC-language)

The MAC-language is a language used to build computer models on the L-layer. It applies a straight algorithmic approach to construct models describing discrete behavior of objects. This means that the MAC-language has the sets of basic components corresponding to arithmetic operations, cycles, conditional statements and other mathematical-algorithmic constructions. Therefore, modeling the complex behavior of an object will require the compilation of a large number of components and will cause the unreadability of CC that may be not acceptable in many cases. Due to this, integrating more complex algorithmic constructions to describe discrete (logical) behavior of objects of different nature into MAC-language is the essential task. The combination of using such constructions on the L-layer (to describe discrete behavior of objects) and special components on the C-layer (to describe continuous behavior of objects) will enable more effective and easy modeling of the hybrid systems and objects.

Example of a hybrid system model compiled in MARS by means of MAC-language

It is proposed to consider modeling the problem of the car motion along three sections of the road with different acceleration. This problem can be described by the following formulation: «The car moved with the uniform acceleration along three sections of its path.

The car passed s_1 km with an acceleration of a_1 m/s² then s_2 km with an acceleration of a_2 m/s² and s_3 km with an acceleration of a_3 m/s². What was the final velocity of the car?».

The continuous behavior of the car in this problem is described by the equation $s(t) = v_0t + at^2/2$ (also it can be described by a second-order linear differential equation or two first-order differential equations: $dx/dt = v$, $dv/dt = a$). The discrete behavior of the car in this problem is characterized by changing numerical value of the parameter «current acceleration» due to the occurrence of a certain event (the car reaches the end of the current section). So the discrete behavior of the car can be described by the following expression (1)

$$a = \begin{cases} a_1, & \text{if } s(t) < s_1, \\ a_2, & \text{if } s_1 \leq s(t) \leq s_2, \\ a_3, & \text{if } s(t) > s_1 + s_2. \end{cases} \quad (1)$$

Thus, the discrete behavior of the car in the problem can be divided into three elementary discrete time intervals in each of which the car has a state represented by a tuple of real numbers named state variables. The algorithmic CC describing the discrete behavior of the car according to expression (1) is presented in Fig 2. The first expression ($s(t) < s_1$) corresponds to the component «1 $s(t) < s_1$ », the second one ($s_1 \leq s(t) \leq s_2$) corresponds to the group of components «2.1 $s(t) \geq s_1$ », «2.2 $s(t) < s_2$ », « $s_1 \leq s(t) < s_2$ » and the last one ($s(t) > s_1 + s_2$) corresponds to another group of components including «3.1 $s(t) \geq s_2$ », «3.2 $s(t) < s_3$ », «3.3 $s_2 \leq s(t) < s_3$ ».

The scheme shown in Fig. 2 uses components named *data holders*: «send a1», «send a2», «send a3», which transmit the value from the input (the left node) to the output (the right node) at every iteration only if the control response «true» is received (by the above node). If the condition $s(t) < s_1$ becomes true, the component «1 $s(t) < s_1$ » sends value «true» at every iteration to the data holder «send a1» which then starts transmitting value a_1 to the CC on the C-layer, which describes continuous behavior of the car. If both conditions 2.1 « $s(t) \geq s_1$ » and 2.2 « $s(t) < s_2$ » are true, the data holder «send a2» transmits value a_2 to the C-layer until other both conditions 3.1 « $s(t) \geq s_2$ » and 3.2 « $s(t) < s_3$ » become true. The model will be stopped when condition 4 « $s_3 \leq s(t)$ » comes true.

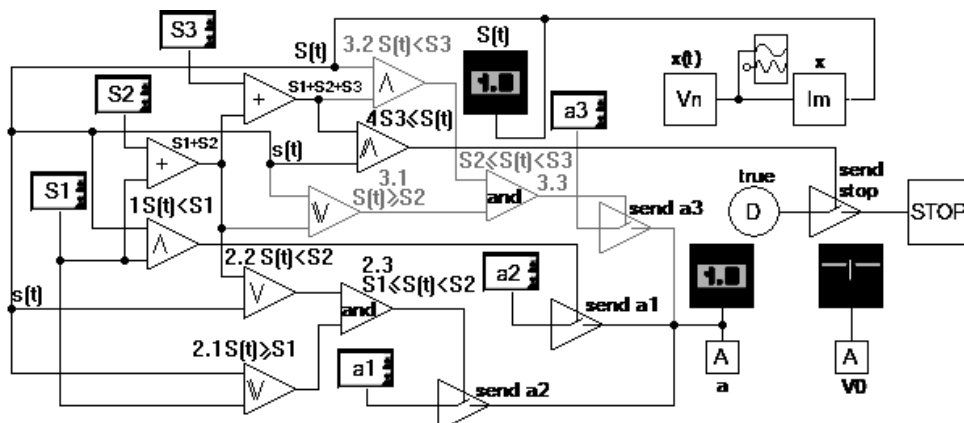


Fig. 2. Algorithmic CC of the problem by means of MAC-language

The given example of the algorithmic CC compiled by means of the MAC-language allows us to infer the necessity of developing and integrating new components for modeling discrete behavior of hybrid systems into the modeling environment MARS.

Statechart diagram

The statechart diagram (or the state diagram) in the Unified Modeling Language (UML) or state machine diagrams (in UML 2.0), which are based on the statecharts of D. Harel [7], represents a conceptual model of an object in the form of a finite-state machine characterizing the behavior of an object as a sequence of its states replacing one another under certain conditions. In the UML the *state* of an object is understood as an element of its behavior during which a certain condition takes place. The *state* can be specified through a set of its properties (relations and attributes) and their current values. There are the following types of actions available for an object in a state: *entry action*, *exit action*, *do activity* and *defferable events* [8]. There are also special kinds of the state (*pseudostates*): *initial state* and *final state*, intended to indicate the beginning and the end of the procedure for changing states. The *event* is understood in UML as the occurrence of a fact initiating the *transition* which is a procedure of changing the state of the object (changing the values of its attributes). *Transitions* can be *trigger* (conditional) and *non-trigger* (unconditional).

The discrete behavior of the car in the considered physics may be represented by the statechart shown in Fig. 3.

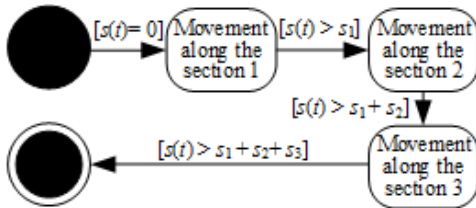


Fig. 3. Statechart diagram of car behavior

Interpretation of the statechart diagram into MAC-language

In the context of the MAC-language we divide the state into two complementary classes: the *discrete state* and the *continuous state*. We understand the *discrete state* as a set of the object parameters and its mathe-

tical model of continuous behavior that takes place on a discrete time interval during which these parameters are assumed to be unchanged and the certain condition is satisfied. We understand the *continuous state* as set of all object attributes (including variables and parameters) at the current time and its mathematical model defining the law of changing these attributes. On the behavioral scheme (on the L-layer) the *state* through its structural relationships determines the description of the continuous behavior of the object by a mathematical model of the C-layer with given parameters and in the current mode. So the *discrete state* determines not only the quantitative (value of parameters) aspect in the behavior of the object but also the qualitative one (the view of the mathematical model). The so-called *initial* and *final states* consider as a signal to the start and the stop of the computer model execution and refer them to the category of events. By the *event* we mean the change in values of the internal or external model attributes which initiates the *transition* from one discrete state to another one. We consider only trigger transitions and assume that all transitions are conditional.

As a practical result of interpretation the statechart diagram into the MAC-language, we developed the L-layer component named «State» with variable number of nodes to represent the object discrete behavior in the form of a finite-state machine. The graphical view of the component «State» for MARS is shown in Fig. 4.

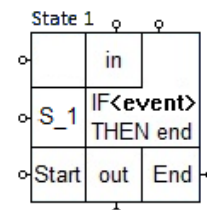


Fig. 4. L-layer component «State»

After receiving value «true» into the node «Start», the component «State» starts transmitting values from node «In» (on the upper side) to the corresponding nodes «Out» (in the bottom side), which then are transmitted at every iteration into C-layer mathematical model through special links marked by the letter «A» on the scheme (Fig. 5).

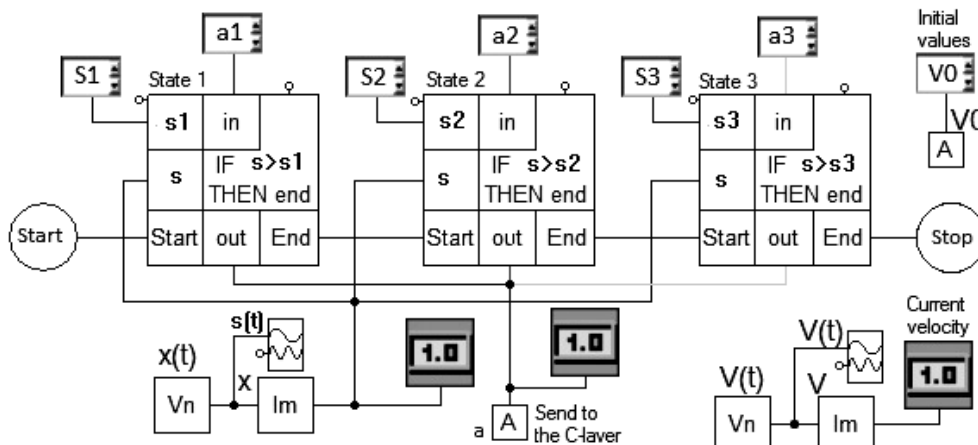


Fig. 5. L-layer CC of considered physics problem containing component «State»

At each iteration the MARS simulation kernel checks the condition written by the user in a symbolic form in the field <event>. If the condition returns «true», the current component stops and transmits the value of «true» to the output node «End», where it is received by the input node «Start» of the next component «State» or by the input node of the component «STOP» which stops the entire model. Thus, only one component «State» on the L-layer and one CC on the C-layer are active at a moment. The result of modeling discrete behavior of the car in the considered physics problem with using new developed component «State» is shown in Fig. 5.

In contrast to the straight algorithmic approach used in the MAC-language (Fig. 2), which is more complex and less understandable, the presented CC explicitly depicts the number of discrete states of the considered object and the conditions of the transition between them.

Conclusion

Interpretation of the statechart diagrams into the MAC-language of the modeling environment MARS will allow modeling a wider range of practical problems as well as will provide an opportunity to build models of discrete-event systems in MARS more easily and efficiently. The suggested approach based on using the statechart diagram simplifies the visual language of the modeling environment MARS and complements the multilevel approach for representing computer models of systems that supposes a decomposition of the system's behavior into discrete, continuous and visual constituents.

References

1. Kolesov Yu.B., Senichenkov Yu.B. Modelirovaniye sistem. Dinamicheskiye i gibridnyye sistemy [Modeling of systems. Dynamic and hybrid systems]. – Saint Petersburg: BKHV-Peterburg Publ., 2012. – 224 p. (In Russian).
2. Dmitriyev V.M., Shutenkov A.V., Zaychenko T.N., Gandzha T.V. MARS – sreda modelirovaniya tekhnicheskikh ustroystv i sistem [MARS – environment for modeling technical devices and systems]. – Tomsk, V-Spektr Publ., 2011. – 277 p. (In Russian).
3. Dmitriyev V.M., Gandzha T.V., Shutenkov A.V. Postroyeniye komp'yuternykh modeley mnogofraktsionnykh fiziko-khimicheskikh sistem gazopromyslovykh ob'yektov v formate metoda komponentnykh tsepey [Computer modeling multifractional physical-chemical systems of gas-field objects in the format of the method of component circuits]. Proceedings of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. – 2012. – Vol. 2, No. 1. – P. 145–150 (In Russian).
4. Dmitriyev V.M., Gandzha T.V., Korotina T.Yu. Sistema vizualizatsii i upravleniya vychislitel'nyim eksperimentom v

srede mnogourovnevnogo modelirovaniya MARS [System for visualization and control of computational experiment in the environment of multilevel modeling]. Proceedings of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. – 2010. – Vol. 1, No. 2. – P. 149–155 (In Russian).

5. Dmitriyev V.M., Gandzha T.V. Metod i yazyk modelirovaniya intellektual'nykh sistem upravleniya slozhnymi tekhnologicheskimi ob'yektami [The method and the language for modeling intelligent control systems for complex technological objects] // Object systems. – 2015. – No. 10. – P. 44–50 (In Russian).

6. Dmitriyev V.M., Gandzha T.V., Korotina T.Yu. Generator modeley komponentov fizicheski neodnorodnykh tsepey na baze interaktivnoy matematicheskoy paneli [Generator of component models of physically inhomogeneous circuits on the basis of an interactive mathematical panel]. Proceedings of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. – 2009. – Vol. 2. – P. 94–99 (In Russian).

7. Harel D. Statecharts: A visual formalism for complex systems // Science of Computer Programming. – 1987. – Vol. 8, No. 3. – P. 231–274.

8. Chunikhin O.Yu. Formal'naya model' mashin sostoyaniy UML [Formal model of UML state machines]. Journal of Applied and Industrial Mathematics. – 2004. – Vol. 7, No. 1. – P. 151–165 (In Russian).

Kochergin M.I.

PhD student, assistant, Department of Computer Control and Design Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)
Ph.: +7 (382-2) 41-39-15
E-mail: max24kochergin@gmail.com

М.И. Кочергин

Интерпретация диаграмм состояний в язык многоуровневого моделирования

Рассматривается моделирование гибридных физико-технических систем в среде многоуровневого моделирования МАРС (СМ МАРС). Проводится сравнение общеалгоритмического подхода языка моделирования алгоритмических конструкций (МАК) СМ МАРС к моделированию гибридных систем и подхода с использованием диаграмм состояний. Обосновывается необходимость интерпретации диаграмм состояний в язык МАК СМ МАРС. Описывается разработанный компонент «Состояние» для описания дискретного поведения объектов на логическом слое СМ МАРС.

Ключевые слова: дискретно-непрерывные системы, гибридные системы, компьютерное моделирование, диаграммы состояний, конечный автомат.

УДК 004.056:519.1

А.К. Мельников

Сложность расчета точных распределений вероятности симметричных аддитивно разделяемых статистик и область применения предельных распределений

Рассматривается применение частотного метода для расчета точных распределений вероятности симметричных аддитивно разделяемых статистик, анализируется его вычислительная и временная сложность. Исследуются значения граничных параметров, для которых на современном этапе частотным методом возможен расчет точных распределений. Сравниваются возможности по расчету точных распределений с использованием частотного метода и тривиального метода полного перебора. Исследуются значения граничных параметров текстов, для которых возможен расчет точных распределений на современном этапе. Рассматриваются возможности применения точных и предельных распределений вероятностей значений статистик для построения критериев согласия в рамках анализа текстовой информации.

Ключевые слова: вероятность, статистика, критерий, точное распределение, предельное распределение, вычислительная сложность метода, производительность многопроцессорной вычислительной системы.

doi: 10.21293/1818-0442-2017-20-4-126-130

Статистические критерии согласия с равновероятным распределением часто используются при построении информационных моделей задач обработки текстов [1] для выделения из массивов текстов таких текстов, знаки в которых распределены случайным равновероятным образом.

Пусть из некоторого массива текстов длины n , состоящих из знаков алфавита $A_N = \{a_1, \dots, a_N\}$ мощности N ,

$$T_{n,N}(v) = \{t_1(v), \dots, t_n(v)\}, v = \overline{1, M}$$

нужно отобрать тексты, являющиеся реализациями случайных выборок длины n из равновероятного распределения на алфавите мощности N .

Выбор текстов с равновероятным распределением знаков производится с помощью применения критерия согласия с равновероятным распределением, использующим некоторую статистику S_n текста длины n , являющейся функцией от h_i частот встречаемости знаков (исходов) текста a_i из алфавита A_N мощности N :

$$S_n = f(n, N).$$

Часть ложно отобранных как равновероятные тексты, содержащих неравновероятное распределение знаков, определяет размер применяемого критерия α .

Для определения размера критерия согласия α необходимо знать вероятность распределения значений, применяемых в критерии статистик S_n

$$P\{S_n \geq c\},$$

связанных с размером критерия α соотношением

$$P\{S_n \geq c\} = \alpha.$$

В критерии согласия могут использоваться как точные значения вероятности распределения значений статистики S_n , расчету которых без ограничения на вид функции f посвящена работа автора [2], так и предельные значения вероятности, определяемые свойствами самой функции f , например, как это показано Хельмертом и Пирсоном [3].

В данной работе не исследуется зависимость размера применяемого критерия от вида функции f статистики S_n , как это делалось в [5], а рассматривается эта зависимость от вида применяемого распределения. Вводится лишь одно ограничение на вид статистики критерия согласия, требуется её симметричность относительно используемых в ней частот встречаемости знаков (исходов) алфавита $a_i - h_i$, рассматривается класс симметричных аддитивно разделяемых статистик [6].

Целью данной работы является описание границ областей возможности вычисления точных распределений вероятностей значений симметричных аддитивно разделяемых статистик на современном этапе развития вычислительной техники и её сравнение с границей области применения предельных распределений.

Расчет точных распределений значений симметричных аддитивно разделяемых статистик

В работе [2] автором уже исследовался вопрос расчета точных распределений статистики S_n хи-квадрат – χ_n , предложенной Карлом Пирсоном в [6, 7]:

$$\chi_n = \sum_{i=1}^N \frac{(h_i - np_i)^2}{np_i},$$

где h_i – частота встречаемости знака (исхода) a_i , n – длина текста (объем выборки), N – число исходов полиномиальной схемы (мощность алфавита A_N) и p_i – вероятность a_i -го исхода. Но расчеты точных распределений статистики χ_n исследовались в общем случае, без учета свойств класса статистик, к которым она принадлежит.

Одним из замечательных свойств класса симметричных аддитивно разделяемых статистик, к которым принадлежит статистика χ_n , является то, что при равновероятном распределении знаков текста

$$\{P(t_i(v) = a_j) = 1/N \mid i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, N\}$$

они симметричны относительно входящих в них частот встречаемости знаков текста – h_i .

Тогда для расчета распределения вероятности значений статистики (распределение вероятности) S_n

$$P\{S_n \geq c\}$$

для равновероятной полиномиальной схемы, когда

$$\{p_i = 1/N \mid i = 1, \dots, N\},$$

можно перейти от перечисления всех текстов длины n в алфавите $A_N = \{a_1, \dots, a_N\}$ мощности N

$$T_{n,N}(v) = \{t_1(v), \dots, t_n(v)\}, \quad v = 1, \dots, N^n$$

к перечислению всех решений уравнения

$$h_1 + \dots + h_N = n \quad (1)$$

в неотрицательных целых числах, т.е. $0 \leq h_i \leq n$. Число таких решений (1) равно [8] числу сочетаний с повторениями из N элементов по n

$$\binom{N+n-1}{n}.$$

С каждым решением уравнения (1) связано

$$N^n / \binom{N+n-1}{n}$$

текстов $T_{n,N}(j)$ длины n в алфавите мощности N .

Тогда вычислительная сложность (число машинных операций) расчета точных распределений значений статистик $P_T\{S_n \geq c\}$ методом, использующим частоты входящих в тексты знаков алфавита, назовем его частотным методом – $C_{\text{чм}}(P_T\{S_n \geq c\})$, определяется количеством решений уравнения (1) в неотрицательных целых числах и имеет вид

$$C_{\text{чм}}(P_T\{S_n \geq c\}) = C(S_n(h_1^{(i)}, \dots, h_N^{(i)})) \times \binom{N+n-1}{n}, \quad (2)$$

где $C(S_n(h_1^{(i)}, \dots, h_N^{(i)}))$ есть вычислительная сложность расчета значений статистики S_n для одного решения $(h_1^{(i)}, \dots, h_N^{(i)})$ уравнения (1) с учетом вклада этого решения в $P_T\{S_n \geq c\}$.

По аналогии с [9] определим вычислительную сложность расчета одного значения статистики S_n от $(h_1^{(i)}, \dots, h_N^{(i)})$ в $(3N + 100)$ машинных операций:

$$C(S_n(h_1^{(i)}, \dots, h_N^{(i)})) = 3N + 100, \quad (3)$$

где $3N$ – число операций для вычисления статистики S_n на равновероятном полиномиальном распределении с N исходами, 100 – число вспомогательных операций.

Аналогично [2] для проведения расчета точных распределений их вычислительная сложность $C_{\text{чм}}(P_T\{S_n \geq c\})$ должна обеспечиваться производительностью используемых вычислительных средств $\Pi_{\text{вс}}$ и временем T проведения расчета.

$$C_{\text{чм}}(P_T\{S_n \geq c\}) \leq \Pi_{\text{вс}} \times T. \quad (4)$$

Следовательно, исходя из (2)–(4) основным соотношением, связывающим значения параметров текста (n, N) , для которых рассчитывается точное распределение, производительность используемых для расчета вычислительных средств $\Pi_{\text{вс}}$ и время проведения расчета T является

$$C(S_n(h_1^{(i)}, \dots, h_N^{(i)})) \times \binom{N+n-1}{n} \leq \Pi_{\text{вс}} \times T. \quad (5)$$

Для условий, принятых в [2] к производительности вычислительных средств: $\Pi_{\text{вс}} = 10^{16}$ операций в секунду, и времени расчета: $T = 30$ дней или $2\,592\,000$ с, поведем оценку параметров (n, N) , для которых на современном этапе точные распределения могут быть рассчитаны частотным методом.

Принимая во внимание ограничения к $\Pi_{\text{вс}}$ и T (5), параметры n и N должны удовлетворять следующему соотношению:

$$\binom{N+n-1}{n} \leq \frac{2,59 \times 10^{22}}{3N + 100}. \quad (6)$$

Используя принятые выше предположения, для всех натуральных целых N от 2 до 256 были рассчитаны максимальные значения параметра n , для которых на вычислительном ресурсе производительностью 10^{16} операций в секунду (оп./с) за «приемлемое» время 1 месяц могут быть рассчитаны точные распределения статистик S_n рассматриваемым частотным методом. Значения параметров приведены в табл. 1 вместе со значениями, полученными при тех же условиях расчета методом полного перебора в [2].

Таблица 1

Максимальные значения параметров текстов, для которых могут быть рассчитаны точные распределения статистик S_n методом полного перебора и частотным методом

Число исходов полиномиальной схемы (мощность алфавита) N	Объем выборки (длина текста) n	
	Метод полного перебора	Частотный метод
5	28	41584
7	23	3233
8	22	1498
9	21	834
10	20	527
15	17	142
20	15	76
26	14	50
36	12	34
52	11	24
64	11	21
96	10	17
128	9	14
192	8	12
256	8	11

Максимальные значения параметров текстов (n, N) , соответствующие табл. 1, приведены на рис. 1.

Анализ значений табл. 1 показывает, что применение частотного метода расчета точных распределений для алфавитов мощности N от 2 до 64 дает возможность рассчитывать точные распределения симметричных аддитивно делимых статистик S_n для длин сообщений n , в 2 раза и более превосходящих длины сообщений, для которых возможен расчет точных распределений методом полного перебора. Для алфавитов мощности N более 64 разницу в длинах сообщений n , для которых могут быть рассчитаны точные распределения сравниваемыми методами, можно считать незначительной.

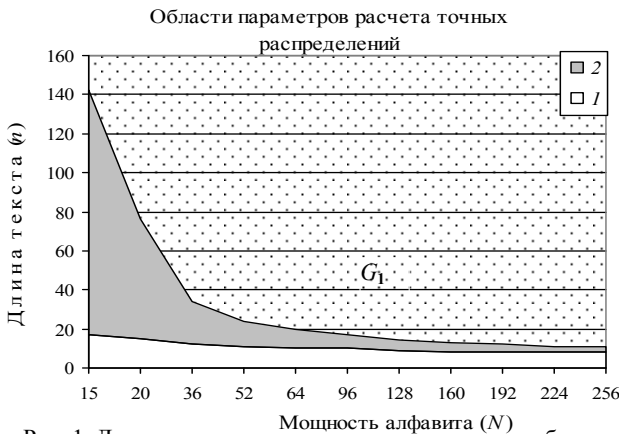


Рис. 1. Диаграмма параметров, для которых могут быть рассчитаны точные распределения: 1 – методом полного перебора, 2 – частотным методом

В [2] автором было показано, что ни разумное увеличение время расчета точных распределений до одного года, ни гипотетическая возможность использования вычислительных средств на два порядка более производительных до 10^{18} оп./с, не дадут сколько-нибудь практически значимого увеличения длин сообщений, для которых можно рассчитать точные распределения статистик.

Для полноты исследования возможностей частотного метода расчета точных распределений и сравнения его с методом полного перебора приведем значения вычислительной сложности расчета точных распределений для различных длин текстов n и мощностей алфавита N . Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Таблица 2
Вычислительная сложность расчета точного распределения симметричных аддитивно разделимых статистик S_n методом полного перебора и частотным методом

Параметры полиномиальной схемы		Вычислительная сложность (оп./с)	
Мощность алфавита N	Длина текста n	Метод полного перебора	Частотный метод
26	50	$2,12 \times 10^{73}$	$9,36 \times 10^{21}$
26	100	$1,97 \times 10^{144}$	$2,31 \times 10^{28}$
26	150	$1,55 \times 10^{215}$	$2,26 \times 10^{32}$
64	30	$6,01 \times 10^{36}$	$6,42 \times 10^{26}$
64	50	$1,00 \times 10^{93}$	$1,08 \times 10^{35}$
128	30	$9,61 \times 10^{65}$	$7,10 \times 10^{34}$
256	30	$1,71 \times 10^{75}$	$2,97 \times 10^{43}$
256	50	$2,76 \times 10^{123}$	$6,66 \times 10^{60}$

Расчеты значений табл. 1 и 2 проводились с помощью программ, составленных на высокоуровневом языке Python [10] 64-битной версии 3.5.1 с использованием модуля decimal для работы с числами большой разрядности.

Сравнение вычислительной сложности расчета точных распределений статистик показывает, что частотный метод имеет гораздо меньшую вычислительную сложность, отличающуюся от вычислительной сложности метода полного перебора на много порядков, но и его сложность не позволяет этим методом проводить расчеты для практически значимых значений параметров на современном этапе развития вычислительной техники [11].

По аналогии с [2] область параметров, для которых частотным методом могут быть рассчитаны точные распределения, назовем областью O_1 . Верхнюю границу области O_1 обозначим через G_1 . Напомним, что по построению O_1 аналогично [2] содержит только пары натуральных целых чисел (n, N) .

Области применения предельных и точных распределения значений симметричных аддитивно разделимых статистик

Автором в работах [2, 9] уже отмечалось важное свойство статистики χ_n , из которого следует, что при

$$m = \min_{i=1}^N np_i \rightarrow \infty$$

её предельное распределение не зависит от вероятностей исходов полиномиальной схемы p_1, \dots, p_N и совпадает с χ^2 -распределением с $(N - 1)$ степенью свободы [3, 7].

В рассматриваемом в статье случае при равновероятном полиномиальном распределении

$$\{p_i = 1/N \mid i = 1, \dots, N\}$$

должно выполняться условие

$$m = n/N \rightarrow \infty.$$

Результаты исследования вопроса, начиная с какого m можно пользоваться предельным распределением, рассматривались автором в [10]. В [12] предлагается ограничение $m \geq 5$, в [13] – $m \geq 20$, в [14] – $m \geq 30$.

В [2] для $m = 5$ автором было проведено построение области предельных распределений O_3 , области значений параметров (n, N) для которых согласно предположению Фишера [13] могут применяться предельные распределения – табл. 2 в [2]. Обозначим аналогично [2] нижнюю границу области O_3 через G_2 . Значения параметров области предельных распределений показаны на рис. 2.

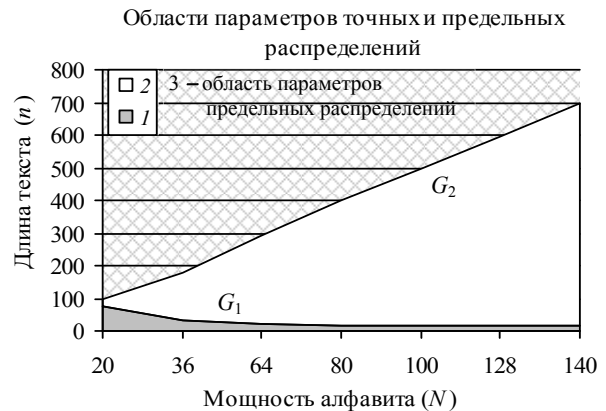


Рис. 2. Диаграмма области предельных распределений, ограниченная снизу границей G_2 : 1 – область точных распределений, 2 – область неопределенности, 3 – область предельных распределений

Ограничения на применение точных и предельных распределений симметричных аддитивно разделимых статистик

Анализ диаграммы областей точных и предельных распределений симметричных аддитивно разделимых статистик на рис. 2 показывает, что между областью точных распределений O_1 и областью пре-

дельных распределений O_3 продолжает располагаться, как и в случае общего вида статистик [2], область неопределенности, для которой на современном этапе не могут быть рассчитаны точные распределения, а предельные распределения не могут быть использованы. Аналогично [2] обозначаем эту область через O_2 . Напомним, что по построению нижней границы области O_2 является граница G_1 , определяющая верхнюю границу области возможного расчета точных распределений O_1 частотным методом. Одновременно верхней границей области O_2 является граница G_2 , определяющая нижнюю границу области применения предельных распределений.

Расчеты значений минимального уровня производительности вычислительных средств, требуемого для расчета частотным методом точных распределений для всех параметров из области неопределенности, могут быть получены из условия (4), принимающего при предположении о времени расчета T , равного 1 месяцу, и стремлении m к бесконечности

$$n = m N$$

следующий вид:

$$P_{\text{вс}} = \binom{N+n-1}{n} \times (3N+100) / 2592000. \quad (7)$$

С помощью выражения (7) проводим расчеты значений минимальной производительности вычислительных средств $P_{\text{вс}}$, которые могут позволить для разных алфавитов частотным методом рассчитать за один месяц точные распределения для области неопределенности при m , равном 5, 20 и 30 соответственно. Результаты расчетов частично приведены в табл. 3.

Таблица 3

Минимальные значения производительности вычислительных средств, необходимые для расчета точных распределений симметричных аддитивно разделяемых статистик S_n во всей области неопределенности частотным методом

Число исходов полиномиальной схемы (мощность алфавита) N	Значение производительности $P_{\text{вс}}$ (оп./с)		
	$m = 5$	$m = 20$	$m = 30$
17	$9,1 \cdot 10^{13}$	$1,3 \cdot 10^{23}$	$7,6 \cdot 10^{25}$
18	$1,4 \cdot 10^{15}$	$7,3 \cdot 10^{24}$	$6,2 \cdot 10^{27}$
19	$2,0 \cdot 10^{16}$	$4,0 \cdot 10^{26}$	$5,1 \cdot 10^{29}$
20	$3,0 \cdot 10^{17}$	$2,2 \cdot 10^{28}$	$4,2 \cdot 10^{31}$
21	$4,5 \cdot 10^{18}$	$1,2 \cdot 10^{30}$	$3,5 \cdot 10^{33}$

Анализ результатов расчета значений производительности вычислительных средств, необходимых для получения частотным методом точных распределений симметричных аддитивно разделяемых статистик S_n для конкретных значений мощности алфавита N во всей области неопределенности O_2 , при условии доступности вычислительного ресурса производительностью не более 10^{16} оп./с, показывает:

– точные распределения симметричных аддитивно разделяемых статистик S_n могут быть рассчитаны для мощностей алфавита N , меньшей 19;

– для мощностей алфавита N больше 20 точные распределения рассматриваемых статистик S_n

не могут быть посчитаны за «приемлемое» время расчета в один месяц;

– для мощностей алфавита N больше 20 точные распределения рассматриваемых статистик S_n не могут быть посчитаны даже при увеличении «приемлемого» времени расчета с одного месяца до одного года;

– опираясь на оценку показателей роста производительности современных и перспективных вычислительных средств [15], можно утверждать, что производительность, требуемая для расчета точных распределений рассматриваемых статистик S_n в области неопределенности, не достижима в ближайшие десятилетия.

Результаты анализа возможностей расчетов точных распределений симметричных аддитивно разделяемых статистик S_n частотным методом и взаимного расположения областей применений точных и предельных распределений статистик для построения критериев согласия показывают нерешенность проблемы выбора распределения вероятности значений статистик для построения критерия согласия для текстов, параметры которых (n, N) находятся в области неопределенности. Следовательно, применение частотного метода даже для более узкого класса симметричных аддитивно разделяемых статистик S_n не решает проблемы неопределенности в выборе вида распределения при построении критериев согласия и не снимает актуальности разработки методов расчета точных распределений статистик.

Заключение и выводы

В работе рассмотрен частотный метод расчета точных распределений значений симметричных аддитивно разделяемых статистик, применяемых при анализе текстов для построения статистических критериев согласия. Проведен расчет параметров границы применения частотного метода.

Показана возможность применения частотного метода для расчета точных распределений значений симметричных аддитивно разделяемых статистик для широкого спектра параметров текстов.

Проведен расчет границы области параметров текстов – области точных распределений, для которых на современном этапе за «приемлемое» время частотным методом могут быть рассчитаны точные распределения.

Проведено сравнение частотного метода расчета точных распределений с методом полного перебора, показано, что для класса симметричных аддитивно разделяемых статистик частотный метод позволяет значительно расширить спектр параметров текстов, для которых могут быть рассчитаны точные распределения.

Показано, что в случае применения частотного метода, как и в случае применения метода полного перебора, ни увеличение производительности вычислительных средств, ни разумное увеличение времени расчета не приводит к практически значимому увеличению значений параметров текстов, для которых могут быть рассчитаны точные распределения.

Сравнение границы области предельных распределений и границы области точных распределений, полученных частотным методом, показало наличие между ними, как и в случае применения для расчета точных распределений метода полного перебора, непрерывной области неопределенности, содержащей параметры, для которых не могут быть рассчитаны точные распределения и неприменимы предельные распределения, так как их применение приводит к потере размерности статистического критерия и ставит под сомнение правильность решения о проверке гипотезы.

Рассчитаны и проанализированы значения производительности вычислительных средств, необходимой для расчета частотным методом точных распределений в области неопределенности. Сделан вывод о том, что требуемая производительность практически не достижима в ближайшее время.

Необходимость проведения статистического анализа текстов на всём практическом спектре их параметров требует ликвидации области неопределенности. Как показано в статье, применение частотного метода расчета точных распределений как альтернативы тривиальному методу полного перебора не решает данной задачи. Решение задачи по расчету точных распределений в области неопределенности может лежать в направлении разработки новых подходов к понятию точных распределений, что является предметом дальнейших исследований автора.

Автор выражает глубокую благодарность д.ф.-м.н., профессору А.Ф. Ронжину за постоянное внимание к работе и её обсуждение.

Литература

1. Чеповский А.М. Информационные модели в задачах обработки текстов на естественных языках. – М.: Национальный открытый университет «ИНТУИТ», 2015. – 228 с.
2. Зелюкин Н.Б. Сложность расчета точных распределений вероятности значений статистик и область применения предельных распределений / Н.Б. Зелюкин, А.К. Мельников // Электронные средства и системы управления: матер. докладов XIII Междунар. науч.-практ. конф. (29 ноября – 1 декабря 2017 г.): в 2 ч. – Томск: В-Спектр, 2017. – Ч. 2. – С. 84–90.
3. Helmer P.R. Uber die Wahrscheinlichkeit von Potenzsummen der Beobachtungsfehler etc. // Z.f. Math. u. Phys. – 1876. – В. 21. – Р. 102–219.
4. Neyman F. On the use and interpretation of certain test criteria for purposes of statistical inference / F. Neyman, E.S. Pearson // Biometrika. – 1928. – Vol. 20-A. – P. 175–240, 264–299.
5. Колодзей А.В. Критерии согласия для схемы выбора без возвращения, основанные на заполнении ячеек в обобщенной схеме размещения // Тезисы докл. VI Междунар. Петрозаводской конф. «Вероятностные методы в дискретной математике», Петрозаводск, 10–16 июня 2004 г. – Обзорение прикладной и промышленной математики. – 2004. – Т. 11, № 2. – С. 239–240.
6. Ивченко Г.И. Математическая статистика / Г.И. Ивченко, Ю.И. Медведев. – М.: Книж. дом «ЛИБРОКОМ», 2014. – 352 с.

7. Pearson K. On the criterion that a given system of deviations from the probable in the case of a correlated system of variables in such that it can be reasonably supposed to have arisen from random sampling // Philos. Mag. Ser. 5. – 1900. – Vol. 50, No. 302. – P. 157–170.

8. Smith P.F. Exact and approximate distributions of the chi-squared statistic for equiprobability / P.F. Smith, D.S. Rae, R.W. Manderscheid, D.S. Silbergel // Commun. Stat., – 1979. – Vol. 8, No. 2. – P. 131–149.

9. Холл М. Комбинаторика. – М.: Мир, 1970. – 424 с.

10. Мельников А.К. Обобщенный статистический метод анализа текстов, основанный на расчете распределений вероятности значений статистик / А.К. Мельников, А.Ф. Ронжин // Информатика и её применения. – 2016. – Т. 10, вып. 4. – С. 89–95.

11. Описание языка программирования Python [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.python.org, www.python.org/docs, свободный (дата обращения: 20.08.2017).

12. Мельников А.К. Исследование путей модернизации реконфигурируемых вычислительных систем в интересах решения вычислительно трудоемких задач // Вестник компьютерных и информационных технологий. – М.: Изд. дом «Спектр», 2016. – № 2 (140). – С. 52–59.

13. Фишер Р.А. Статистические методы для исследователей. – М.: Госстатиздат, 1958. – 73 с.

14. Кендалл М.Г. Теория распределений / М.Г. Кендалл, А. Стьюарт. – М.: Наука, 1966. – 302 с.

15. Крамер Г. Математические методы статистики. – М.: Мир, 1975. – 648 с.

16. Реконфигурируемые мультиконвейерные вычислительные структуры / В.А. Каляев, И.И. Левин, Е.А. Семерников, В.И. Шмойлов. – Ростов-н/Д: Изд-во ЮНЦ РАН, 2008. – 397 с.

Мельников Андрей Кимович

Канд. техн. наук, доцент ВАК по специальности, гл. науч. сотр. НТЦ ЗАО «ИнформИнвестГрупп»
Тел.: +7 (495) 287-00-35
Эл. почта: ak@iigroup.ru

Melnikov A.K.

Processing complexity in exacting probability distributions of symmetrical additively partitioned statistics and application area of limit distributions

In the paper the authors consider application of the frequency method to calculate the exact probability distributions of symmetrical additively partitioned statistics, and analyze its computational and time complexity. The values of boundary parameters are investigated, for which, at present, could be calculated the exact distributions using the frequency method. The possibilities of exact distributions calculation with the help of the frequency method and the trivial method of full enumeration are compared. Besides, the analyses is done for the values of boundary parameters of texts, for which it is now possible to calculate exact distributions. The application possibilities for exact and limit probability distributions of statistics are considered, and could be used further for fitting criterion creation within symbolic data analysis.

Keywords: probability, statistics, criterion, exact distribution, limit distribution, computational complexity of method, performance of multiprocessor computer system.

УДК 004.03

Д.Д. Зыков, Д.Р. Уразаев, Н.Ю. Хабибуллина

Обзор комплексных решений в сфере учета энергоресурсов

Целью данной статьи является анализ современных решений в сфере учета энергоресурсов. В ходе исследования рассматриваются структуры и каналы передачи данных, использованные при разработке систем учета энергоресурсов отечественными производителями. Результатом проведенного обзора является сравнительный анализ основных технических решений, используемых при разработке данных систем.

Ключевые слова: энергоресурсы, учет, система учета, структура, интерфейсы связи.

doi: 10.21293/1818-0442-2017-20-4-131-133

Проблема повышения эффективности энергообеспечения в сфере российской экономики является одной из наиболее актуальных задач. Реализуемая в нашей стране политика, направленная на повышение энергетической эффективности национальной экономики, предусматривает комплексную модернизацию инфраструктуры электроэнергетики страны. При таком подходе важную роль играют процессы оснащения всех категорий потребителей современными решениями в сфере учета энергоресурсов [1].

В последнее время повышение стоимости энергоресурсов способствует обращению особого внимания на сбор и учет данных по всем видам энергоресурсов. В связи с этим возникает потребность в создании эффективных систем учета энергоресурсов как для объектов жилищно-коммунальных хозяйств, так и для промышленных предприятий. Попытка найти комплексное решение проблемы учета энергоресурсов подразумевает повышение эффективности учета с использованием методов автоматизации, модернизацию и внедрение современных комплексов технических средств и систем учета энергоресурсов.

Развитие данного направления привело к росту числа участников российского рынка автоматизации учета энергопотребления и вместе с ним к увеличению числа технологических решений, применяемых при проектировании автоматизированных систем коммерческого учета энергоресурсов. Становится все актуальнее проблема поиска универсального подхода по созданию комплексных систем. Ключевым вопросом при этом является выбор структуры системы, определяющей коммутационную среду и дальнейшее проектирование в целом. В имеющихся в литературе обзорах основное внимание уделяется либо выбору коммутационной среды, либо рассмотрению актуальности применения той или иной структуры системы. В данной статье предпринята попытка провести сравнительный анализ имеющихся решений в данной сфере и поставить задачу поиска универсального подхода.

Основной целью автоматизированных систем контроля и учета энергоресурсов (АСКУЭР) является сбор, хранение, передача данных о потреблении энергоресурсов в многоквартирных жилых домах, учреждениях, офисных зданиях и других организациях жилищно-коммунального хозяйства (ЖКХ), а

также в населенных пунктах с преобладающим частным сектором [2].

Задачи АСКУЭР:

- сбор и хранение данных;
- передача данных на специализированный сервер;
- формирование отчетов по потреблению энергоресурсов.

Функции АСКУЭР:

- измерение и контроль объемов и параметров потребления энергоресурсов;
- сбор, учет и хранение данных о характеристиках и потреблении энергоресурсов;
- отображение показаний и мониторинг нагрузок на систему в реальном времени;
- измерение и контроль баланса объекта автоматизации и системы в целом;
- контроль работоспособности приборов учета и вычислительной техники.

Применение данных систем позволяет сформировать общее представление об энергопотреблении и на основании этого выработать рекомендации по энергосбережению с дальнейшим контролем и корректированием проводимых мер.

Актуальностью внедрения данных систем для потребителя является уменьшение стоимости используемого энергоресурса, а для энергокомпаний – более равномерное и эффективное распределение как в сфере капиталовложений, так и в наращивании коэффициента полезного действия в сфере энергообеспечения.

Анализ передовых мировых практик, проведенный J'son & Partners Consulting, позволяет сделать вывод о том, что активное развитие современных технологий учета энергоресурсов позволяет вывести на принципиально новый уровень качество сбора и анализа данных об энергопотреблении потребителей; повысить эффективность оперативного управления энергетическими активами; активно вовлекать потребителей энергии в процессы регулирования собственного энергопотребления [3].

На данный момент российский рынок систем АСКУЭР может предложить большое количество типов автоматизированных систем коммерческого учета энергоресурсов, комплексов технических средств и устройств сбора данных. Рассмотрим следующих производителей: ЗАО «ЭСКО 3Э» [4], АО «ННПО им. М.В. Фрунзе» [5], ЗАО ИТФ «Системы и технологии» [6], НПО «КАРАТ» [7], АО «МЗТА» [8].

Для большинства систем характерна трехуровневая структура:

1. Нижний уровень. Состоит из первичных измерителей, ведущих непрерывный учет потребляемых энергоресурсов и передачу данных на следующий уровень.

2. Средний уровень. Состоит из устройств сбора и передачи данных (УСПД) или маршрутизаторов, опрашивающих первичные измерители и передающих сгруппированные данные наверх.

3. Верхний уровень. Представляет центральный узел сбора данных, обеспечивающий хранение и обработку данных, поступающих со всех локальных УСПД, а также решение прикладных задач.

К менее распространенным структурным решениям можно отнести двухуровневые и «два с половиной уровня» системы. В первом варианте первичные измерители соединены с сервером напрямую, во втором – УСПД заменяет более простое устройство – коммутатор [9].

Главным недостатком данных решений можно назвать отсутствие промежуточного сбора, хранения и обработки данных, полученных с первичных измерителей. При применении такой структуры показания со всех приборов учета контролируемого объекта поступают непосредственно на сервер системы, что существенно нагружает канал передачи данных, являющийся одним из проблемных элементов системы.

В свою очередь трехуровневая система характеризуется большой гибкостью при построении системы и функциональностью при использовании, а также повышенной надежностью с точки зрения хранения информации.

В рассматриваемых системах отечественных производителей преобладают АСКУЭР с трехуровневыми структурами (табл. 1).

Таблица 1

Структурные особенности комплексных систем учета энергоресурсов отечественных производителей

Производители	Структура	Масштабируемость
ЗАО «ЭСКО ЗЭ»	3	–
АО «ННПО им. М.В. Фрунзе»	3	–
ЗАО ИТФ «Системы и технологии»	3	+
НПО «КАРАТ»	2,5	–
АО «МЗТА»	3	–

Выбор структуры и используемых интерфейсов при разработке систем оказывает влияние на масштабируемость внутридомовых архитектур комплексных систем, что позволяет наращивать уже имеющуюся систему, подключая датчики протечки, дыма, без дополнительного увеличения стоимости инфраструктуры.

Как показал анализ российского рынка АСКУЭР, разрабатываемые системы сбора данных имеют различные типы интерфейсов, среди которых: проводные (RS-485, RS-232, CAN Bus), радио (ZigBee, WiFi, радио 433/866 МГц), PLC, мобильная связь, оптоволокно.

Проводные интерфейсы зарекомендовали себя как надежные каналы передачи данных в различных системах удаленного мониторинга и управления. Однако менее часто применяются в современных АСКУЭР, где на первое место выходит упрощенность масштабирования. Применение витой пары как среды передачи данных существенно усложняет процесс масштабирования данных систем и увеличивает стоимость самих систем.

Совершенно противоположные характеристики присущи беспроводным интерфейсам связи в системах АСКУЭР. Они быстро устанавливаются и легко масштабируются, однако качество связи сильно зависит от многих факторов окружающей среды, оказывающих влияние на распространение радиоволн. С целью улучшения надежности применяют mesh-технологии, позволяющую избежать потерь связи при выходе из строя одного или нескольких узлов сети [10].

Для получения надежных каналов обмена данными рекомендуется использовать комбинацию проводных и беспроводных технологий. Из табл. 2 видно, что широкое распространение во внутридомовых системах связи получила комбинация PLC и радиосвязи.

Весомым аргументом в пользу PLC служит отсутствие затрат на прокладку дополнительных коммуникаций и на содержание сети. Из используемых каналов передачи данных такими особенностями обладают только беспроводной интерфейс связи ZigBee и радиоканальные системы, работающие в диапазоне 433–866 МГц. Но в радиоканальных системах, работающих в диапазоне 433–866 МГц, требуется разработка собственных протоколов обмена данными для объединения в самоорганизующуюся сеть различных датчиков, устройств [11, 12].

Таблица 2

Каналы передачи данных, используемые в комплексных системах отечественных производителей

Производители	Каналы передачи данных									
	до концентратора							от концентратора		
	PLC	RF	ZigBee	GSM/GPRS	RS-485	RS-232	CAN	Ethernet	GSM/GPRS	Оптоволокно
ЗАО «ЭСКО ЗЭ»	+	+			+	+		+	+	+
АО «ННПО им. М.В. Фрунзе»	+	+		+	+			+	+	
ЗАО ИТФ «Системы и технологии»	+		+		+			+	+	
НПО «КАРАТ»					+	+			+	
АО «МЗТА»					+	+	+	+		

Использование сотовой связи для информационного обмена в рассматриваемой системе сети, в частности, возможное применение типа сети GSM, не требует прокладки коммуникаций, но отличительным свойством является составление дополнительной статьи расходов по оплате трафика и использованию услуг операторов сотовой связи.

Требование дополнительных финансово-временных затрат при расширении парка приборов учета энергоресурсов может поставить под сомнение экономическую целесообразность данного мероприятия.

Заключение

Данный обзор показывает отсутствие в настоящий момент единого подхода к проектированию АСКУЭР. Сейчас производители данных систем используют при их построении как двухуровневые, так и трехуровневые структуры.

На отечественном рынке преобладают трехуровневые структуры, имеющие возможность резервного хранения данных и комбинирования типов связи с сервером. Разнообразие структур и каналов связи характеризуется отсутствием единого регламента. Все решения по внедрению систем комплексного учета принимаются в индивидуальном порядке, в зависимости от особенностей объектов автоматизации.

Авторами предлагается разработать единый подход к созданию комплексной системы, основанный на трехуровневой структуре, позволяющий выполнить резервирование как на уровне хранения данных, так и коммуникационной среды, что значительно повысит надежность всей системы.

Литература

1. Умные сети. Интеллектуальные сети электроснабжения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Smart_Grid_\(Умные_Сети\)](http://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Smart_Grid_(Умные_Сети)), свободный (дата обращения: 30.10.2017).
2. Колокольникова А.И. Применение автоматизированных информационных систем в бытовом секторе / А.И. Колокольникова, Д.В. Карнаухов // *Философские проблемы информационных технологий и киберпространства*. – 2013. – Т. 1, вып. 5. – С. 121–131.
3. Российский рынок интеллектуальных счетчиков в отраслях распределения ресурсов – электроэнергии, тепла, воды и газа до 2020 года. Обновление [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://json.tv/ict_telecom_analytics_view/rossiyskiy-rynok-intellektualnyh-schetchikov-v-otraslyah-raspredeleniya-resurov-elektroenergii-tepla-vody-i-gaza-do-2020-goda-20161103010938, свободный (дата обращения: 30.10.2017).
4. Комплексная система АСКУРДЭ «НИИ ИТ-ЭСКО» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.esco3e.ru/products/17/160/>, свободный (дата обращения: 31.10.2017).
5. Автоматизированная система коммерческого учета энергоресурсов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.nzif.ru/askue/aiis-kue-na-baze-kts-mayak.html>, свободный (дата обращения: 31.10.2017).
6. АСКУЭ бытовых потребителей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.sicon.ru/prod/aiis/bit/>, свободный (дата обращения: 31.10.2017).

7. Диспетчеризация энергоресурсов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.karat-npo.com/solutions/dispatching/>, свободный (дата обращения: 31.10.2017).

8. Автоматизация и диспетчеризация учета энергоресурсов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mzta.ru/resheniya/inzhenernye-sistemy/uchet-i-kontrol-energoresursov>, свободный (дата обращения: 31.10.2017).

9. Ковцова И.О. Обработка и передача учетных данных для классических и цифровых электроподстанций. – М.: Прометей, 2016. – С. 23–36.

10. Вершинин А.С. Аппаратная реализация гетерогенного PLC RF-модема для автоматизированных систем контроля и учета энергоресурсов / А.С. Вершинин, Ю.О. Мякочин // *Электронные средства и системы управления*. – 2016. – Т. 1, № 3 (37). – С. 56–59.

11. Обзор решений, используемых в коммерческих системах учета энергоресурсов для передачи данных в гетерогенных системах связи / И.Ю. Поляков, А.Н. Клименко, Ю.О. Мякочин и др. // *Доклады ТУСУРа*. – 2017. – Т. 20, № 3. – С. 181–185.

12. Павлюк М. Автоматизированный учет электроэнергии. Модули связи PLC и ZigBee / М. Павлюк, А. Назаров, Ю. Сахно // *Электроника: Наука, технология, бизнес*. – 2014. – № 7. – С. 38–47.

Зыков Дмитрий Дмитриевич

Канд. техн. наук, доцент,
директор Центра системного проектирования,
доцент каф. комплексной информационной безопасности
электронно-вычислительных систем ТУСУРа
Тел.: +7 (382-2) 70-15-29, доб. 29-80
Эл. почта: dmitry.zykov@tusur.ru

Уразаев Дамир Раисович

Инженер-конструктор
Центра системного проектирования ТУСУРа
Тел.: +7 (382-2) 70-15-29, доб. 29-81
Эл. почта: udr@csp.tusur.ru

Хабибуллина Надежда Юрьевна

Канд. техн. наук, доцент, доцент каф. компьютерных
систем в управлении и проектировании ТУСУРа
Тел.: +7 (382-2) 41-47-17, доб. 20-94
Эл. почта: hnu@kcup.tusur.ru

Zykov D.D., Urazayev D.R., Khabibulina N.Yu.

Overview of complex solutions for energy resources accounting

Analysis of modern solutions in the accounting field of energy resources is a purpose of this article. Structures and transmission channels used in the development of accounting systems of energy resources by domestic producers are discussed during the research. Comparative analysis of main technical solutions used in the development of these systems is the result of this review.

Keywords: energy resources, accounting, accounting system, structure, communication interfaces.

УДК 37.371.133.2

Н.Д. Хатьков, А.Е. Мандель

Практический опыт использования мультимедийной системы дистанционного обучения Sydney для коллективной формы обучения

Приведены результаты практического использования мультимедийных технологий в образовании при коллективном обучении. На примере использования системы обучения Sydney показано, что дидактические требования к программному обеспечению лекционного и тестового материала для коллективной формы обучения существенно ниже, чем для индивидуального дистанционного обучения. Отмечено существенное уменьшение технической сложности подготовки учебных материалов. Показаны возможности виртуальных лабораторных работ при коллективной форме обучения.

Ключевые слова: практика, дистанционное обучение, дидактический материал, тест, модули, оптимизация.

doi: 10.21293/1818-0442-2017-20-4-134-137

Актуальность использования новых образовательных технологий

В настоящее время для успешной работы преподавателя недостаточно использования традиционных средств обучения, включая и то, что сейчас широко используется компьютерный проектор. Обусловлено это, прежде всего, резко возросшим объемом информации, которую обучаемому необходимо освоить в кратчайшие сроки. По этому образовательному аспекту особенно отличаются технические дисциплины. Например, только на основе простейшего самого первого автоматического центробежного регулятора Уатта была создана целая теория [1]. Небольшое по сути техническое описание дало впоследствии большой объем информации.

Если взять феноменологическое описание световой волны в эффектах, которые она проявляет в веществе, то можно увидеть большое количество независимых факторов, которые необходимо учитывать в современных математических моделях. В результате число уравнений, описывающих какое-либо физическое явление, будет зависеть от объема задачи нелинейным образом [2].

Такие обстоятельства практически отсутствуют в гуманитарных образовательных курсах. Из этого возникает актуальность поиска и формирования таких образовательных технологий, которые были бы эффективны при обучении основополагающим принципам явлений природы, конструктивным особенностям технических устройств. Доведя основной физический принцип до обучаемого, т.е. неполные данные об устройстве, в последующем дополнительный большой объем информации он может получить в том числе от эффекта самоорганизации образования, который присутствует при коллективной форме обучения [3]. Кроме того, дополнительное информационное предоставление дидактического материала с помощью проекторной и компьютерной техники может существенно увеличить информационный поток для обучаемого.

Цель и задачи работы

Существующее программное обеспечение, которое используется в образовании, является достаточно сложным и многообразным. Оно имеет боль-

шое количество специальных методов и средств, обеспечивающих эффективное обучение. В связи с этим представляет определенный интерес выявление избыточности свойств программного обеспечения, используемого для коллективной формы обучения, с целью повышения эффективности его использования. В связи с этим в данной работе рассмотрены проблемные задачи, связанные с применением обучающих систем для коллективной формы обучения, с учетом нескольких каналов восприятия информации обучаемым.

Проблематика использования компьютерных обучающих систем

Вместе с успешным развитием компьютерной техники развивались и образовательные компьютерные технологии. В настоящий момент они находятся на достаточно высоком техническом уровне, включающем в том числе полноценное наличие компьютерной техники и компьютерных широкополосных средств связи в образовательной среде. Возникла избыточность программного обеспечения (ПО), позволяющего донести требуемый учебный материал до обучаемого [4]. Теперь для оптимального применения ПО в образовательных целях придется проводить его анализ в приложении той дисциплины, для которой оно будет наиболее эффективно. Это непростая задача, поскольку в ней имеются не только известные независимые факторы, но и ряд неизвестных, которые зачастую определяются опытным путем. Разработчики про подобные факторы не предоставляют информацию, поскольку она относится к методологии, формам и технике преподавания – нетехническим параметрам обучающей системы.

Например, такой параметр, как процент участия преподавателя в обучении с применением обучающих программ. Довольно важный параметр – сколько времени на один тот же курс будет затрачивать преподаватель без обучающей программы и с ней. Фактически этот параметр указывает на процент автоматизации преподавательского труда. За ним следом идет другой параметр – какой объем информации способен передать обучаемому преподаватель в заданный отрезок времени, используя ту или иную программу. К тому же среди этих неизвестных фак-

торов обязательно найдутся такие, которые будут субъективными, принадлежащими только этому конкретному преподавателю, а также объему базовых начальных знаний в группе при коллективном обучении. При формировании целевой функции оптимизационного процесса для построения эффективной траектории достижения главной цели – обучения необходимо руководствоваться наличием такого главного свойства ПО – оно должно учить. Подобное свойство обычно определяет сам преподаватель. При этом он должен хорошо разбираться, например, в том, для чего нужен электронный учебник.

Организации, занимающиеся сбытом ПО, чаще занимают чисто рекламную позицию, заключающуюся в том, что все учебные пособия – книги в электронном виде – обязательно учат. Из этого обычно следует простенький вопрос, а преподаватель тогда зачем? Если исходить из того, что учебник в основном предоставляет необходимую информацию и является только одним из компонентов обучающего процесса, тогда становится понятно, что преподаватель обязательно будет стоять перед многофакторным выбором с неизвестными параметрами как в области выбора необходимого ПО, так и в целесообразности его применения.

Место аудиовизуального канала восприятия

Человек может воспринимать информацию по нескольким каналам восприятия – визуальный, аудиальный и кинестетический. С точки зрения объема передаваемой информации в единицу времени визуальный канал вне конкуренции. Особенно важным при этом является возможность ПО предоставлять не только статические, но и подвижные изображения. Тем самым задействуется естественный механизм привлечения внимания. Существенным дополнением к визуальному каналу восприятия является его аудиосопровождение. Именно на эти эффективные каналы восприятия опирается любое мультимедийное ПО в образовании. И уже это должно стать базовым критерием оценки его возможностей.

Появление аудиокниг также связано с естественной формой подачи информации человеку. Чтение – это искусственная форма передачи знаний, требующая знания письменности, которая содержит в себе прямые средства и правила кодирования и декодирования записанной информации разнообразными значками читающим. Поэтому чтение – медленный и затратный процесс, к тому же требующий концентрации внимания. С точки зрения эффективности передачи информации книги и сайты, несущие большой объем текстовой информации, должны использоваться в учебном процессе в последнюю очередь как резервный информационный ресурс. К сожалению, технологичность изготовления текстово-графических образовательных ресурсов в настоящее время еще существенно выше, чем мультимедийных, поэтому в образовательной среде они доминируют.

Еще более медленный по передаче информации кинестетический канал используется либо в крайних случаях, связанных с физическими возможностями

человека, исключая использование им других каналов восприятия, либо в тех дисциплинах, где без него просто не обойтись (например, вкус блюда у поваров, запахи у химиков и пр.).

Решение задачи использования аудиовизуального канала восприятия

Поскольку факторов, определяющих эффективность использования ПО для обучения, достаточно много, то для существенного уменьшения их количества возьмем достаточно узкий участок его применения с учетом мультимедийных свойств. Используем широко применяемую коллективную форму обучения с наличием компьютерной и проекционной техники, имеющей возможности воспроизведения звука (что, кстати, не всегда встречается на практике).

Основной способ ведения занятий – лекционный с присутствием преподавателя, дополнительный – в виде практических и лабораторных занятий. Контроль за обучением осуществляется через компьютерные тесты. В качестве основного ПО, которое обладает мультимедийными свойствами, будет использоваться обучающая система Sydney [5].

Лекции. Формат лекции определим субъективно, исходя из возможностей преподавателя, учитывая его загрузку учебным процессом и предполагая, что лишняя (избыточная) работа для конкретного курса выполняться не будет. Избыточная работа будет выполняться преподавателем уже после верификации курса в учебном процессе. Опыт использования лекционных модулей на практике при групповом обучении показал, что большая часть возможностей (указаны не все), которые имеет ПО модуля, представленные в таблице, оказалась не востребована в этой форме обучения. Это обусловлено самой методикой представления материала в лекциях. Например, подвижный указатель, позволяющий привлечь внимание к изображению во время синхронного воспроизведения аудиовизуальной информации, оказался не нужен, поскольку преподаватель легко это делает при вербальном общении с аудиторией.

Использование аудио- и видеoinформации в модуле не потребовалось в связи с тем, что в операционной системе присутствуют медиапроигрыватели, что позволяет достаточно легко их применять, выйдя на время из ПО модуля, в произвольном порядке с медиафайлами, отвечающими требованию сиюминутной потребности при подготовке к лекции и во время лекции.

Бегущая строка оставшегося времени показа кадра лекции с автоматическим включением следующего как сервисная услуга была отключена из-за психологического отвлечения внимания обучаемого и несоответствия темпа предоставления информации преподавателем, а также его отвлечения на вопросы из аудитории от слушателей. Подобное неиспользование ряда свойств лекционного модуля при создании дидактического материала обусловлено объективной причиной – коллективной формой обучения. Следствием этого является существенное повышение эффективности работы преподавателя при создании контента в лекционных модулях.

Лекционный модуль

Имеющиеся элементы	Используется
Визуализация текста	Да
Подвижность текста	Нет
Вставка копии текстовых абзацев и рисунков из графических файлов	Да
Изменение цвета фона кадра	Да
Вставка аудиофайлов	Нет
Подвижный указатель произвольной формы	Нет
Вставка аудио и видео	Нет
Визуальные эффекты, привлекающие внимание	Нет
Заданное время автоматического показа кадра	Нет

Основной и нетрудоемкой операцией, которая позволяет исключить влияние разнообразных шрифтов на воспроизведение текстового материала от редактора к редактору, разнообразных форматов файлов и др., является создание соответствующих скриншотов экрана с последующим небольшим их графическим редактированием и вставкой в лекционный модуль.

Также не требуется работа по синхронизации аудио- и видеoinформации в кадре. Следует отметить, что вид предоставляемой информации на экране, как текстовый, так и графический, состоящий из графиков, формул, изображений, является статическим. На практике получилось так, что чаще всего текстовая информация несет на себе нагрузку точного определения того или иного физического явления, математического выражения и др. При этом, как оказалось, наилучшая восприимчивость к текстовой информации была тогда, когда в нем ключевые слова подчеркивались одинарной или двойной чертой. Этот момент помогал и преподавателю – ему не нужно было читать текст, поскольку при первом взгляде на него достаточно легко было определить смысловую нагрузку кадра и потом сделать к нему свои комментарии. На этом этапе у обучаемого использовались параллельно два канала восприятия – визуальный и аудио. Обучаемому не требовалось записывать определения, поскольку в начале лекции объявлялось, что данный модуль ему будет впоследствии передан.

От него требовалось делать записи по комментариям преподавателя, разъясняющим содержательную часть представленной информации. В совокупности наблюдается положительный эффект при оптимизации требуемых операций для проведения лекции, при этом обучаемому поступает большой объем аудиовизуальной информации, дополненной вербальным общением.

Тесты. Тестовый модуль имеет большое количество свойств [5], основные из которых относятся к форме задания вопросов и ответов. Основным контентом теста является содержательная часть в виде вопросов и ответов, над которыми работает преподаватель, прежде чем формировать тестовый модуль. Наиболее простым по содержанию и реализации является классический открытый тест с выбором правильных и неправильных вопросов.

Приемлемой на практике оказалась структура теста, состоящего из одного вопроса и 3, 4 ответов,

которые могут быть все правильными, все неправильными, половина правильных, один правильный и т.д. В этом случае результат теста трудно угадать. Тогда преподавателю остается только создать банк вопросов и ответов и скомпилировать ресурс тестового модуля. Такая структура теста наиболее легка к реализации.

Недостатки подобной структуры при оценивании нивелируются преподавателем при коллективном проведении тестирования, поскольку у него есть возможность наблюдения за ходом тестирования. Достаточно одного-двух взглядов на экран обучаемого, оценивая его поведение во время сдачи теста, и становится понятно, что он может получить в результате. Именно момент присутствия преподавателя позволяет нивелировать методические недостатки теста. Кроме того, если после тестирования преподаватель использует дополнительные контрольные вопросы для подтверждения полученной обучаемым оценки или ее изменения, то надежность процедуры оценивания существенно возрастает. Уменьшается при этом и общее время оценивания группы обучаемых.

Одной из проблем всех только что изготовленных тестов является оценка его валидности. Еще одна проблема присутствует у любого обучаемого – это определенная неуверенность в своих знаниях перед их оценкой. Это создает обучаемому некомфортную, стрессовую обстановку.

Для решения этих проблем, особенно в начальный период создания набора тестов по курсу, лучше всего получался процесс предварительного тестирования обучаемых на материалах теста, которые примерно соответствовали половине информационного объема курса – на так называемых двух контрольных точках, расположенных равномерно на траектории изучения материалов. Здесь обучаемый мог впервые на первой контрольной точке ознакомиться с интерфейсом программы, а также с формой тестового вопроса и получить дополнительные консультации у преподавателя. Преподаватель же мог оценить валидность теста и в последующем его скорректировать – данных при коллективной форме обучения у него было достаточно. На второй контрольной точке обучаемый уже имеет полную информацию о процедуре прохождения тестового контроля и достаточно хорошо оценивает его объективность.

На завершающем этапе прохождения курса преподаватель, используя режим тренинга, имеющийся у тестового модуля, передает его обучаемому вместе с лекционными модулями для подготовки к окончательной сдаче зачета или экзамена с помощью тестового ПО. При этом объем информации, которую содержит тест на конечном этапе, может быть увеличен по сравнению с содержанием лекционных модулей из-за возможности проведения коллективных консультаций по материалам всего курса и учитывая, что обучаемый может самостоятельно изучить дополнительную литературу.

Виртуальная лаборатория. Структура лабораторной работы является модульной и содержит полный набор компонент для изучения моделей физических процессов, например в области курса по

электродинамике. Основное преимущество преподавателя здесь состоит в том, что у него имеется возможность реализовать разумное сочетание изучения реальных физических процессов на лабораторном оборудовании и на виртуальном ПО.

Реальные измерения не охватывают в полной мере весь физический процесс, а представляют только его часть вследствие технических трудностей реализации полных измерений. В то же время для виртуальных лабораторных работ подобные трудности отсутствуют и дело остается за математическими моделями физических явлений. В использовании ПО [5] решена задача автоматизации построения функциональных математических моделей и создания на их основе лабораторных работ. Поэтому преподаватель может достаточно быстро сформировать лабораторный практикум, учитывая наличие реальных лабораторных работ. Поскольку преподаватель присутствует на занятии при проведении лабораторных работ, то наличие поясняющих модулей и тестовых модулей допуска и оценивания полученных результатов существенно упрощается.

Практика показала, что объем графического материала, который создают обучаемые при исследованиях в реальной лаборатории и в виртуальной, отличается на порядок. Виртуальная лаборатория позволяет создать за короткий промежуток времени стандартный отчет по готовому шаблону и автоматически сформированным графикам, отражающим гораздо более полно суть физического явления. Выводы к работам становятся более весомыми. Особенно это видно в момент перехода обучаемых от реальных работ к виртуальным.

Заключение

В результате практического использования мультимедийных технологий в образовании при коллективном обучении выяснилось, что дидактические требования к программному обеспечению компонент, представляющих лекционный и тестовый материал, существенно ниже, чем для индивидуального дистанционного обучения. Причем снижение технических требований ведет не к ухудшению качества проведения учебного процесса, а наоборот, повышает его эффективность в целом как со стороны подготовки учебных материалов (необходимы в основном текстово-графический контент, простая форма тестовых вопросов, упрощенный запуск программного обеспечения, отсутствие сетевых средств сопровождения учебного процесса, наличие реальных экспонатов), так и со стороны их восприятия обучаемым (широкое использование аудиовизуального канала восприятия, эффекта самоорганизации обучения, наличие вербального общения с преподавателем, получение лекционных и тестовых компонент для самостоятельной работы). Для создания модулей лабораторных работ технические требования при коллективном обучении практически остаются прежними.

Благодарности

Большой вклад в работу по внедрению мультимедийных технологий в учебные курсы внесла кафедра сверхвысокочастотной и квантовой радиотех-

ники ТУСУРа – основные редакторы курсов доступны каждому преподавателю в его личном профиле более 10 лет. На кафедре радиотехники и защиты информации ТУСУРа в последние 3 года используются лекционные и тестовые модули в курсах «Программно-аппаратная защита информации», «Защита информационных процессов в операционных системах».

Литература

1. Максвелл Д.К. Теория автоматического регулирования (линеаризованные задачи) / Д.К. Максвелл, И.А. Вышнеградский, А. Стодола. – М.: Изд-во Академии наук СССР, 1949. – 429 с.
2. Самарский А.А. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры / А.А. Самарский, А.П. Михайлов. – М.: Физматлит, 2001. – 320 с.
3. Зорина Л.Я. Отражение идей самоорганизации в содержании образования // Педагогика. – 1996. – № 4. – С. 105–109.
4. Вайндорф-Сысоева М.Е. Методика дистанционного обучения: учеб. пособие для вузов / М.Е. Вайндорф-Сысоева, Т.С. Грязнова, В.А. Шитова. – М.: Юрайт, 2017. – 194 с.
5. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 990548. Интегрированная система дистанционного обучения Sydney / Ю.А. Павличенко, Н.Д. Хатков. – Заявка № 990423. Дата поступления 01 июня 1999 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ, г. Москва, 29 июля 1999 г.

Хатков Николай Данилович

Канд. техн. наук, доцент каф. СВЧ и КР ТУСУРа
Тел.: +7-909-542-94-73
Эл. почта: sydney@t-sk.ru

Мандель Аркадий Евсеевич

Д-р физ.-мат. наук, профессор каф. сверхвысоких частот и квантовой радиотехники (СВЧ и КР) ТУСУРа
Тел.: +7-961-097-60-48
Эл. почта: mandelae@svch.rk.tusur.ru

Khatkov N.D., Mandel A.E.

Practical experience of using multimedia distance learning system Sydney for the collective form of learning

The results of the practical use of multimedia technologies in collective education are presented. Using the multimedia e-learning Sydney as an example, it has been shown that didactic requirements for the software of lecture and test material for the collective form of education are substantially lower than for individual distance learning. A significant reduction in the technical complexity of preparing learning materials was noted. The possibilities of virtual laboratory works under the collective form of learning are shown.

Keywords: practice, e-learning, didactic material, placement test, modules, optimization.

УДК 519.21

А.Г. Буймов

Закономерности поведения кривых забывания

Предлагается математическая интерпретация базовых требований, которым должны удовлетворять функции забывания. Рассматриваются различные варианты функции «торможения» процессов распада следа памяти, введенной Уэйном Виккелгреном в дифференциальное уравнение вероятности сохранения запоминаемой информации. Изучается их влияние на поведение получаемых функций забывания и соответствие этих функций базовым требованиям. Получено новое решение уравнения, которое описывает поведение кривых забывания, качественно похожее на результаты заучивания информации путем интенсивных повторений.

Ключевые слова: кривые забывания, функция Виккелгрена.

doi: 10.21293/1818-0442-2017-20-4-138-141

Поиск «правильных» формул, описывающих реакцию памяти на изменение условий и техник запоминания и сохранения информации, обусловлен желанием исследователей получить инструмент прогнозирования этих реакций, инструмент формирования новых гипотез при подготовке и проведении новых экспериментов. Ниже приведена система требований (базовых свойств), ограничивающая выбор функций, которые могут использоваться в качестве моделей кривых забывания. Получена модель, позволяющая учесть эффект торможения процессов забывания информации на начальном этапе ее заучивания.

Базовые свойства кривых забывания

Пусть имеется образовательная программа $\{x_0(t_i), i=1, k\}$, в процессе выполнения которой некоторому обучающемуся (ученику, студенту, стажеру, специалисту) в момент времени t_i передается информация $x_0(t_i)$, актуальная для запоминания, и пусть эта информация (актуальные знания, умения, навыки) усваивается и сохраняется в памяти ученика до момента времени $t > t_i$ с вероятностью $p_i(t_i, t)$.

Вероятности $p_i(t_i, t)$ могут рассматриваться как индивидуальные характеристики способности и готовности ученика к освоению и запоминанию предлагаемых элементов образовательной программы. Немецкий психолог Герман Эббингауз [1], впервые применивший количественные методы при исследовании процессов запоминания и сохранения (удержания) запомненной информации, назвал зависимости вероятностей $p_i(t_i, t)$ от длительности интервалов удержания $\tau = (t - t_i)$ кривыми или функциями забывания, а в качестве математической модели этих зависимостей предложил использовать выражение

$$r = a / (a + b \log \tau), \tau \geq 1, \quad (1)$$

которое при измерении независимой переменной τ в минутах и численных значениях параметров $a = 1,84$, $b = 1,25$ хорошо согласовывалось с результатами его шестилетних (с 1879 по 1885 г.) экспериментов с собственной памятью.

История попыток психологов найти подходящие математические модели кривых забывания в программах экспериментального исследования свойств памяти людей разного возраста, разных профессий, разного состояния здоровья и т.д. отражена в обзорах [2–4]. В них отмечается, что до Эббингауза все исследования процессов запоминания разных видов информации, ее сохранения и забывания носили качественный характер. Общеизвестным было лишь то, что однажды запомненная информация или приобретенные навыки со временем постепенно теряются. В дальнейшем последователи Эббингауза были заняты развитием количественных методов исследования динамических процессов памяти, проводили эксперименты, накапливали опытные данные, конструировали параметрические модели кривых забывания, стараясь добиться хорошего согласования модели с опытными данными на всех (коротких и длинных) интервалах времени, прошедших после акта запоминания, по методу наименьших квадратов.

Было предложено и сопоставлено с данными экспериментальных исследований более сотни математических моделей кривых забывания, и постепенно, за период с 1879 по 1974 г., сформировалось общее мнение, что эти модели следует искать в классе функций со свойствами:

$$\lim_{\tau \rightarrow \infty} p(\tau) = 0; 1 \geq p(\tau) \geq 0; \\ dp(\tau)/d\tau \leq 0; d^2 p(\tau)/d\tau^2 \geq 0, \quad (2)$$

т.е. в классе ограниченных неотрицательных непрерывных монотонно убывающих выпуклых функций с первыми двумя непрерывными производными. Этим требованиям удовлетворяет, например, экспоненциальная функция $p(\tau) = \exp(-c\tau)$.

В 1895 г. немецкий психолог, специалист в области экспериментальной психологии Адольф Йост обнаружил еще одно важное свойство памяти, согласно которому скорость забывания запомненной информации с течением времени уменьшается (Закон Йоста) [2]. Это свойство проявляется в характерном поведении кривых забывания: они изменяются во времени как убывающие функции с «тяжелыми хвостами». Математически это свойство можно представить в виде формулы (3) для относитель-

ной скорости изменения вероятности воспроизведения запомненной информации:

$$\frac{dp(\tau)}{d\tau} / p(\tau) = \frac{d}{d\tau} \ln p(\tau) = -cf(\tau). \quad (3)$$

Поскольку эта скорость в соответствии с законом Йоста со временем уменьшается, то функция $f(\tau)$ в формуле (3) также должна убывать. Ее можно интерпретировать как «функцию торможения» процессов забывания информации, оставившей в памяти свой след, или, что то же самое, как функцию торможения процессов распада следов памяти.

В итоге можно сказать, что соотношения (2) и уравнение (3) представляют собой математическую интерпретацию базовых качественных характеристик кривых забывания, обнаруженных экспериментаторами.

Влияние функций торможения на модели кривых забывания

Конкретизируем вид функции $f(\tau)$, задав ее уравнением

$$df(\tau)/d\tau = -\mu f(\tau)^{n+1}, \quad n \geq 0, \quad f(0) = 1, \quad (4)$$

и рассмотрим несколько вариантов его решений при разных значениях n .

1. Пусть $n = 0$. В этом случае решением уравнения (4) будет

$$f(\tau) = \exp(-\mu\tau). \quad (5)$$

Подставляя (5) в дифференциальное уравнение (3) и решая его при начальном условии $p(0) = \lambda$, получим

$$p(\tau) = \lambda \exp\left[-\frac{c}{\mu}(1 - e^{-\mu\tau})\right]. \quad (6)$$

Функция (6) удовлетворяет всем требованиям (2), кроме одного: с увеличением τ вероятность $p(\tau)$ воспроизведения запомненной информации не убывает до нуля: $p(\infty) = \lambda \exp(-c/\mu)$.

2. Пусть $n = 1$. В этом случае решения уравнений (4) и (3) соответственно принимают вид

$$f(\tau) = (1 + \mu\tau)^{-1}; \quad (7)$$

$$p(\tau) = \lambda(1 + \mu\tau)^{-c/\mu}. \quad (8)$$

В данном случае поведение обеих функций, (7) и (8), полностью отвечает требованиям (2).

3. В общем случае (4) функция торможения $f(\tau)$ и соответствующая вероятность $p(\tau)$ определяются формулами (9) и (10):

$$f(\tau) = (1 + n\mu\tau)^{-1/n}, \quad (9)$$

$$p(\tau) = \lambda \exp\left\{-\frac{c}{\mu(n-1)}\left[(1 + n\mu\tau)^{\frac{n-1}{n}} - 1\right]\right\}. \quad (10)$$

В предельных случаях формулы (9), (10) переходят: а) в (5) и (6) при $n \rightarrow 0$; б) в (7) и (8) при $n \rightarrow 1$; в) при $n \rightarrow \infty$ формулы (9) и (10) принимают вид (11) и (12):

$$f(\tau) = 1, \quad (11)$$

$$p(\tau) = \exp(-c\tau). \quad (12)$$

В последнем случае функция $f(\tau)$ не учитывает эффектов торможения процессов распада следов памяти. При этом динамика забывания информации аналогична динамике распада следов радиоактивных веществ, изучаемой в физике. Отсюда вывод: формула (12) не может использоваться в качестве модели кривых забывания, так как не соответствует закону Йоста.

В случае «а», наоборот, тормозящий эффект, который моделируется функцией $f(\tau)$, представленной формулой (5), настолько велик, что через некоторый конечный промежуток времени порядка $\tau_0 \cong 3\mu^{-1}$ остаточный след памяти практически перестает разрушаться и дальше может храниться сколь угодно долго, а исходная информация воспроизводится с вероятностью $p(\infty) = \lambda \exp(-c/\mu)$. Этот вариант также не может использоваться в качестве модели кривых забывания, поскольку противоречит гипотезе о том, что без специальных поддерживающих мероприятий любая информация в конце концов забывается.

Формула (8) впервые была получена Уэйном Виккелгреном, американским специалистом в области математической психологии. После публикаций [5–7] она стала одной из самых популярных моделей кривых забывания. Формула Виккелгрена была найдена как решение уравнений (3), (4) при $n = 1$. Возможно, такой выбор был связан с тем, что уравнение (4) динамики поведения функции $f(\tau)$ при $n = 1$ напоминает уравнение движения тела в среде с сопротивлением. Оно связывает ускорение торможения с потерями кинетической энергии, пропорциональной квадрату скорости движения. Таким уравнением, в частности в механике, описывается изменение скорости тормозящего автомобиля, скорости пули, попавшей в вязкую среду, и т.д. Однако более важным, конечно, явилось то, что при этом было обнаружено хорошее совпадение модели с опытными данными многочисленных экспериментальных исследований. На рис. 1 дано сравнение опытных данных Эббингауза и функции Виккелгрена, согласованной с ними по методу наименьших квадратов.

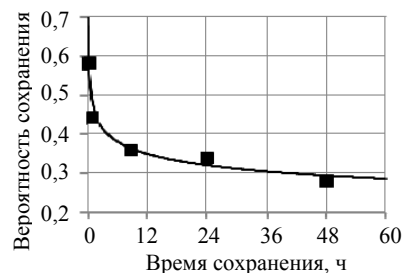


Рис. 1. Сравнение опытных данных Эббингауза (1885 г.) с теоретической моделью функций забывания, полученной Виккелгреном (1974 г.)

Такое хорошее совпадение теоретической модели, полученной «на кончике пера», с экспериментальными данными в большом диапазоне интервалов удержания оказалось неожиданным, хотя многие исследователи и раньше предполагали степенной характер поведения кривых забывания и искали объяснение этому явлению [2–4, 8].

Новый вариант функции забывания и ее особенности

Рассмотрим еще один вариант модели динамических процессов забывания. Для этого в уравнении (3) в качестве функции торможения примем $f(\tau) = (p(\tau)/\lambda)^n$ и перепишем его в виде

$$\frac{d}{d\tau} \ln p(\tau) = -c(p(\tau)/\lambda)^n, \quad n \geq 0, \quad p(0) = \lambda. \quad (13)$$

Решение уравнения (13) можно представить формулой

$$p(\tau) = \lambda(1 + n c \tau)^{-1/n}. \quad (14)$$

При любых конечных $n > 0$ решение (14) сохраняет вид степенной функции Викалгрена. При $n = 0$ оно вырождается в $p(\tau) = \lambda \exp(-c\tau)$. При $n \rightarrow \infty$ превращается в постоянную величину $p(\tau) = \lambda$.

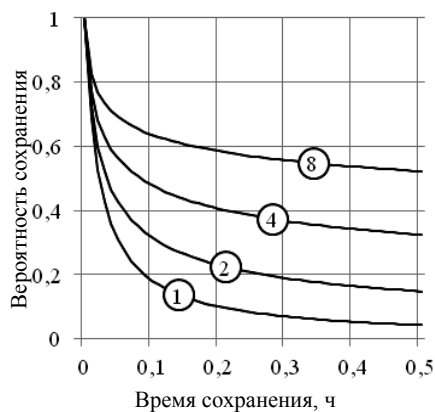


Рис. 2. Графики функций забывания $p(\tau) = \lambda(1 + n c \tau)^{-1/n}$ при $n = 1, 2, 4, 8$

На рис. 2 приведены графики функций забывания (14), построенные при $\lambda = 1$ и нескольких значениях показателя степени $n = 1, 2, 4, 8$. Поведение кривых напоминает результаты интенсивного заучивания информации.

Для пояснения рассмотрим случай, когда образовательная программа $\{x_0(t_i), i = \overline{1, k}\}$ реализуется как программа репетиционного типа $\{x_0(t_i) = x_0, i = \overline{1, k}\}$, или программа повторения пройденного, на каждом шаге которой учитель повторно предъявляет обучающемуся к заучиванию одну и ту же информацию x_0 . Кроме того, примем допущение, что реакции обучающегося на информационные воздействия $x_0(t_i)$, $x_0(t_j)$ при разных $i \neq j$ могут рассматриваться как независимые события.

Для этого случая можно записать формулу

$$R_k(t_k, t) = 1 - \prod_{i=1}^k (1 - p_i(t_i, t)), \quad (15)$$

в которой $R_k(t_k, t)$ означает вероятность сохранения запомненной информации до момента времени t после k -го цикла ее заучивания: $t > t_k > t_{k-1} > \dots > t_1$, т.е. после завершения репетиционной программы [8].

Под интенсивным процессом запоминания будем понимать ситуацию, когда сеансы заучивания следуют один за другим практически непрерывно, и считать, что выполняется условие $t_k = t_{k-1} = \dots = t_1$. При этом будем также считать, что за время репетиционной программы способности ученика к запоминанию не изменяются, и отразим это предположением, что вероятности $p_i(t_i, t)$ от номера сеанса не зависят.

В этом случае формула (15) может быть представлена в виде

$$R_k(\tau) = 1 - (1 - p_1(\tau))^k. \quad (16)$$

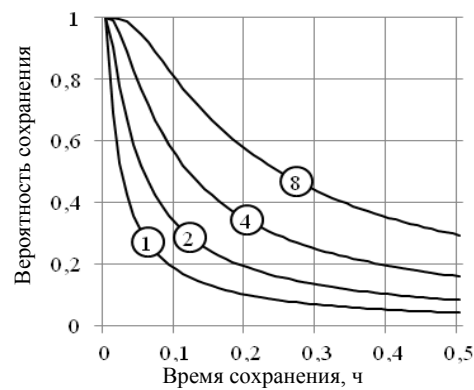


Рис. 3. Графики функции (16) как вероятностной модели результата интенсивной репетиционной программы, включающей $k = 1, 2, 4, 8$ сеансов заучивания информации

На рис. 3 изображены графики функции забывания, рассчитанные по формуле (16) и отражающие результаты интенсивных репетиционных программ, содержащих $k = 1, 2, 4, 8$ сеансов повторного заучивания заданной информации.

Формулы (14) и (16) принципиально отличаются и методами получения, и своим видом, и интерпретацией. Тем не менее, качественное сходство поведения кривых на рис. 2 и 3 наводит на мысль, что и в одном, и в другом случае речь может идти о моделях дополнительных мероприятий по закреплению заучиваемой информации. Если формулы (15), (16) соответствуют репетиционным программам с учителем, в которых при каждом повторении учащемуся предоставляются исходные материалы, и он может сверяться с ними, то модель (14) этого не предполагает. Здесь речь может идти только об упорядочении и осмыслении того, что уже запомнено. Такая работа тоже способствует закреплению и удержанию изученного материала.

Заключение

Введенная система базовых свойств кривых забывания является удобным инструментом корректной оценки и выбора предлагаемых моделей.

Модель с учетом эффекта торможения процессов забывания информации на начальном этапе ее заучивания без повторений открывает возможность более детального анализа эффективности репетиционных программ с повторным предъявлением изучаемых материалов.

Литература

1. Contributions to memory // Wikipedia, the free encyclopedia: http://en.wikipedia.org/wiki/Hermann_Ebbinghaus (01.11.2017).
2. Rubin D.C. One Hundred Years of Forgetting: A Quantitative Description of Retention / D.C. Rubin, A.E. Wenzel // *Psychological Review*. – 1996. – Vol. 103, No. 4. – P. 743–760. – <https://dukespace.lib.duke.edu/dspace/handle/10161/10157> (01.11.2017).
3. Robertson G.S. A Brief History of the Mathematical Definition of Forgetting Curves // Grant Sheridan Robertson's personal blog. – Friday, June 26, 2009. – <http://www.ideationizing.com/2009/06/brief-history-of-mathematical.html> (04.11.2017).
4. White K.G. Forgetting functions // *Animal Learning & Behavior*. – 2001. – Vol. 29 (3). – P. 193–207. – <https://link.springer.com/article/10.3758/BF03192887>
5. Wickelgren W.A. Trace resistance and the decay of longterm memory. // *Journal of Mathematical Psychology*. – 1972. – 9. – P. 418–455. <http://www.columbia.edu/~nvg1/Wickelgren/papers/1972bWAW.pdf> (04.11.2017)
6. Wickelgren W.A. Single-trace fragility theory of memory dynamics. // *Memory & Cognition*. – 1974. – Vol. 2(4). – P. 775–780. – <http://www.columbia.edu/~nvg1/Wickelgren/> (04.11.2017).
7. Wixted J.T. The wickelgren power law and the ebbinghaus savings function / J.T. Wixted, S.K. Carpenter // *Psychological Science*. – 2007. – Vol. 18(2). – P. 133–134. – <http://public.psych.iastate.edu/shacarp/publications.html> (04.11.2017).

8. Anderson R.B. The power law as an emergent property // *Memory & Cognition*. – 2001. – Vol. 29(7). – P. 1061–1068. – <https://link.springer.com/article/10.3758%2FBF03195767> (04.11.2017).

9. Буймов А.Г. Вероятностная интерпретация законов освоения и сохранения навыков в программах репетиционного типа // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование*. – 2013. – № 1(166). – С. 306–310.

Буймов Аркадий Георгиевич

Д-р техн. наук, профессор каф. экономики
Томского государственного университета систем
управления и радиоэлектроники
Тел.: +7-913-827-40-76
Эл. почта: agb2005@yandex.ru

Buymov A.G.

Regularities in the behavior of the forgetting curves

A mathematical interpretation of the basic qualitative requirements for functions of forgetting is proposed. The author describes the different options of the "braking" function in the decay of the memory trace, introduced by Wayne Wickelgren into the differential equation of the probability of saving the learned information. The impact on the forgetting functions behavior and their compliance to basic requirements are investigated. A new solution for the equation that describes the behavior of the curves of forgetting is obtained, which is quantitatively similar to the results of the memorization through intense repetitions.

Keywords: forgetting curves, retention curves, the function Wickelgren.

УДК 004.934.2

Д.И. Новохрестова

Временная нормализация слогов алгоритмом динамической трансформации временной шкалы при оценке качества произнесения слогов в процессе речевой реабилитации

Рассмотрены проблемы временной нормализации записей слогов перед сравнительной оценкой качества произнесения. Для временной нормализации использован алгоритм динамической трансформации временной шкалы (dynamic time warping, DTW). Проведено сравнение количественных оценок качества произнесения слогов, подсчитанных на основе DTW-расстояния, метрики Минковского со значением параметра, равным 3, и коэффициента корреляции. Проведено сравнение оценок, полученных с применением нормализации по интенсивности и сглаживания временных последовательностей значений амплитуд звуковых файлов перед применением DTW. Сделан вывод о применимости DTW для временной нормализации слогов для оценки разборчивости в процессе речевой реабилитации. В качестве итоговой оценки качества произнесения выбрано DTW-расстояние, получаемое на основе алгоритма без предварительной нормализации и сглаживания.

Ключевые слова: оценка качества речи, качество произнесения слогов, временная нормализация, динамическая трансформация, временная шкала.

doi: 10.21293/1818-0442-2017-20-4-142-145

Ежегодно в России регистрируется более 25 000 новых случаев раковых заболеваний органов речеобразующего аппарата, общее же количество пациентов с такой локализацией – более 100 000 [1, 2]. Зачастую в ходе лечения прибегают к хирургическому вмешательству, а после операции встает вопрос о необходимости речевой реабилитации. В настоящий момент оценка качества речи в процессе реабилитации оценивается субъективным методом, а именно экспертной оценкой согласно ГОСТ Р 58040–95 [3]. Ввиду субъективности оценки невозможно точно оценить динамику восстановления речи, а также своевременно заметить возможное ухудшение качества речи из-за неэффективности занятий для данного пациента. Поэтому возникла необходимость в автоматизации процесса оценки качества речи с минимизацией участия специалиста-логопеда в нем. Конечная цель, достигаемая путем автоматизации процесса, – сокращение времени реабилитации. Также была поставлена задача получения оценки в течение времени, приближенного к реальному, в идеальном варианте – получение оценки в режиме реального времени при записи сеанса оценки качества произношения слогов для реализации биологической обратной связи.

Ранее была предложена математическая модель и реализованный в Matlab модуль для оценки качества произношения слогов на основе сравнения спектрограмм Фурье [4]. Существенным минусом предложенного подхода является не автоматизированный на настоящее время этап по временной нормализации слогов, а именно сегментация слогов на фонемы. Существующие в настоящий момент алгоритмы сегментации либо имеют большую ошибку точности определения границ фонемы, либо не могут выполняться в режиме реального времени. Поэтому было принято решение о применении иного метода временной нормализации – алгоритма динамической трансформации временной шкалы (dy-

namic time warping – DTW). Хотя данный алгоритм и обладает некоторыми недостатками (отсутствие возможности оценки только конкретной проблемной фонемы), но на данный момент является наилучшим решением задачи временной нормализации в процессе оценки качества произношения слогов.

Алгоритм DTW

DTW предназначен для трансформирования временных последовательностей на основе поиска наибольшего подобия, к которым и относятся значения амплитуд звуковых файлов [5]. Этот алгоритм был выбран для реализации ввиду простоты его реализации, а также квадратичной сложности классического алгоритма, что является важным параметром из-за необходимости оценки в режиме реального времени для организации биологической обратной связи.

DTW основан на построении матриц расстояний между всеми элементами первой последовательности и всеми элементами второй последовательности (матрица d размера $m \times n$, где d_{ij} – расстояние между точками p_i и q_j последовательностей P и Q соответственно, m – длина последовательности P , n – длина последовательности Q) и построении матрицы деформаций на основе матрицы расстояний (матрица D размера $m \times n$, где D_{ij} определяется согласно (1)). Расстояние d_{ij} в DTW принято считать на основе расстояния городских кварталов (2) или евклидова расстояния (3) [6]:

$$D_{i,j} = d_{i,j} + \min(D_{i-1,j}, D_{i,j-1}, D_{i-1,j-1}), \quad (1)$$

$$d_{i,j} = d(p_i, q_j) = |p_i - q_j|, \quad (2)$$

$$d_{i,j} = d(p_i, q_j) = (p_i - q_j)^2, \quad (3)$$

где p_i и q_i – точки последовательностей P и Q соответственно.

Трансформированные последовательности получаются путем выбора элементов каждой из после-

довательности согласно индексам элементов, принадлежащих оптимальному пути. Также преимуществом алгоритма является то, что по итогам выполнения алгоритма уже подсчитана мера разности между временными последовательностями – DTW-расстояние. Оно представляет собой стоимость пути, основанного на оптимальном пути трансформации. Значение DTW-расстояния равно значению элемента $D_{n,m}$ матрицы D . Принципиальная блок-схема алгоритма приведена на рис. 1.

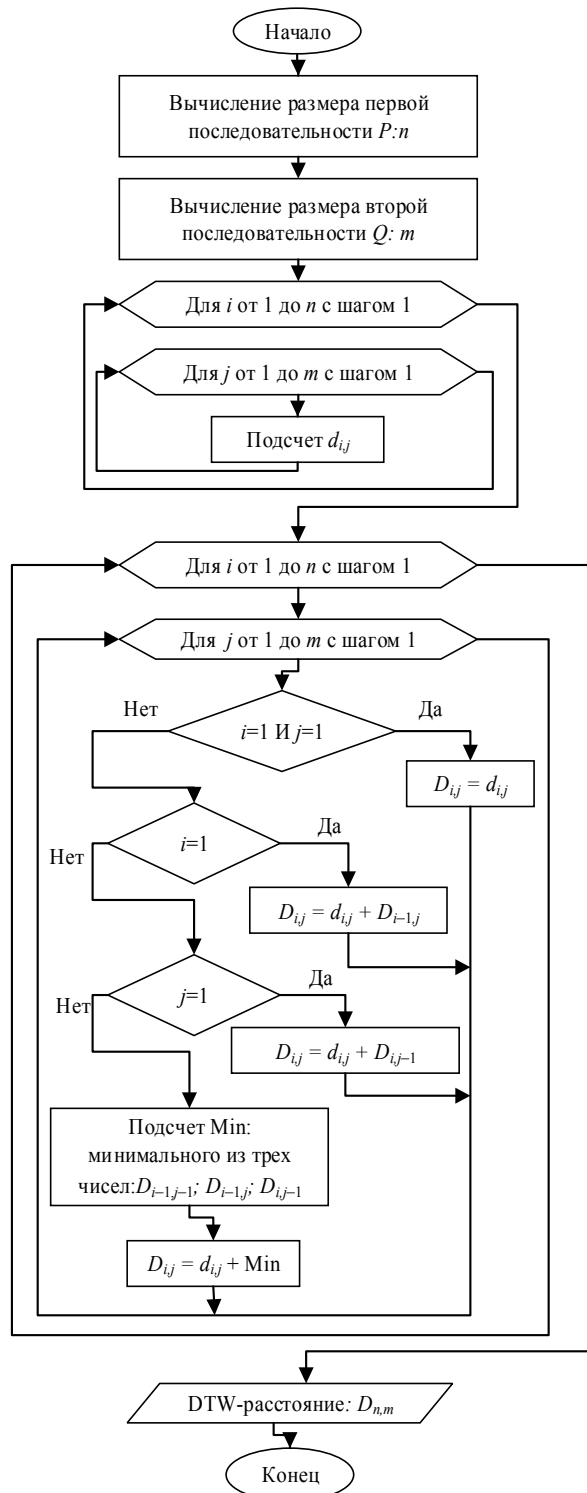


Рис. 1. Блок-схема DTW с подсчетом DTW-расстояния

Количественные оценки

Помимо DTW-расстояния, были подсчитаны расстояния между трансформированными последовательностями на основе метрики Минковского (4) [6] и коэффициента корреляции (5) [7]. Применимость коэффициента корреляции для сравнительной оценки качества произношения слогов рассмотрена в [8].

$$d(p, q) = \sqrt[t]{\sum_{k=1}^n |p_k - q_k|^t}, \tag{4}$$

где p и q – точки трансформированных временных последовательностей; n – длина трансформированной последовательности; $t = 3$ – параметр метрики Минковского.

$$r_{pq} = \frac{\sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p})(q_i - \bar{q})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p})^2 \sum_{k=1}^n (q_i - \bar{q})^2}}, \tag{5}$$

где r_{pq} – коэффициент корреляции; \bar{p} и \bar{q} – выборочные средние трансформированных числовых последовательностей P^* и Q^* соответственно.

При условии наличия нескольких метрик, которые могут быть использованы как мера различия между временными последовательностями, есть необходимость в проведении сравнения оценок, получаемых на основе этих метрик. Для этого на основе списка слогов с наиболее подверженными изменениям фонемами [4] было произведено 3 сеанса записи: два сеанса с нормальным произношением слогов и третий сеанс с произношением слогов без использования языка (искаженное произношение с имитацией изменений, характерных для речи пациентов с раком языка, перенесших операцию).

Были подсчитаны меры различия для пар слогов норма1–норма2, норма1–искажение, норма2–искажение, где норма1 – запись слога первого сеанса, норма2 – запись этого же слога из второго сеанса, искажение – запись этого же слога из третьего сеанса. Если говорить о DTW-расстоянии и метрике Минковского, количественная оценка пары норма1–норма2 должно быть меньше, чем оценка норма1–искажение и норма2–искажение.

Для коэффициента корреляции смотрелась близость коэффициента к 1, соответственно коэффициент для пары норма1–норма2 должен быть ближе к 1, чем коэффициент норма1–искажение и коэффициент норма2–искажение. В табл. 1 приведены результаты работы алгоритма, указаны средние оценки каждой пары сеансов, найденные как среднее между соответствующими парами слогов этих сеансов, относительные оценки сеансов (как отношение среднего оценок норма1–искажение и норма2–искажение к средней оценке норма1–норма2), количество ошибок для каждой меры различия (суммарное количество ошибок, количество ошибок для пар норма1–искажение, количество ошибок для пар норма2–искажение), время работы алгоритма (среднее время

на одну пару слогов при подсчете оценок для трех сеансов).

Таблица 1
Сравнение результаты работы алгоритмов оценки на основе различных мер различия

		Мера различия		
		DTW-расстояние	Метрика Минковского	Коэффициент корреляции
Оценка сеанса	Норма1–норма2	1,405	0,137	0,401
	Норма1–искажение	1,480	0,141	0,365
	Норма2–искажение	2,248	0,214	0,413
	Общая	1,864	0,178	0,389
Относительная оценка сеанса		0,754	0,772	0,970
Количество ошибок	Норма1–искажение	32	40	52
	Норма2–искажение	2	16	46
	В обоих парах	1	12	33
	Время выполнения, с	3,02	3,30	5,32

Сравнение показало, что наименьшим количеством ошибок обладают оценки, полученные на основе DTW-расстояния, а также время, затрачиваемое на его подсчет, минимальное среди представленных.

Нормализация и сглаживание временных последовательностей

При анализе пар слогов, для которых были допущены ошибки при подсчете количественной оценки, возникло предположение о чувствительности DTW к различиям в интенсивности голоса на записи, а также к наличию случайных кратковременных шумов. Поэтому была рассмотрена возможность нормализации или сглаживания временной последовательности перед применением DTW-алгоритма. Были сравнены результаты, полученные на основе последовательностей без нормализации и сглаживания, последовательностей с нормализацией по интенсивности (приведение интенсивности звука к константе), сглаженных на основе простого скользящего среднего (6) последовательностях, а также нормализованных по интенсивности сглаженных на основе простого скользящего среднего последовательностей.

$$\bar{y}(k) = \frac{1}{n} \sum_{t=k-\frac{n-1}{2}}^{t=k+\frac{n-1}{2}} y(t), \quad (6)$$

где n – размер окна сглаживания (обязательно нечетное число); $y(t)$ – t -й элемент временного ряда; $\bar{y}(k)$ – k -й элемент сглаженного временного ряда.

Применение сглаживания только простой скользящей средней на данном этапе исследований обосновано тем, что данное сглаживание обладает минимальной сложностью алгоритма (линейной сложностью). Его применение может показать необходимость сглаживания последовательностей, а при наличии необходимости сглаживания подбор алгоритма сглаживания – отдельная задача.

Результаты приведены в табл. 2, подсчитана средняя оценка сеанса, относительная оценка сеанса, количество ошибок, среднее время выполнения одного расчета. Размер окна сглаживания n в скользящей средней равен 13.

Таблица 2
Сравнение результатов работы алгоритма DTW с нормализацией и сглаживанием числовых последовательностей

		Алгоритм			
		DTW	DTW с нормализацией по интенсивности	DTW со сглаживанием	DTW с нормализацией по интенсивности и сглаживанием
Оценка сеанса	Норма1–норма2	1,405	4,410	0,225	0,402
	Норма1–искажение	1,480	4,878	0,259	0,445
	Норма2–искажение	2,248	4,723	0,232	0,430
	Общая	1,864	4,800	0,246	0,438
	Относительная оценка сеанса	0,738	0,754	0,919	0,918
Количество ошибок	Норма1–искажение	32	29	33	29
	Норма2–искажение	2	37	42	36
	В обоих парах	1	19	24	19
Время выполнения, с		3,02	3,78	3,26	3,80

Применение нормализации по интенсивности незначительно уменьшило количество ошибок в парах норма1–искажение по сравнению с оценками по DTW без нормализации, однако сильно увеличилось количество ошибок в парах норма2–искажение, а также в 19 раз возросло количество ошибок в обоих парах, в связи с чем было принято решение о реализации алгоритма DTW для использования в процессе автоматизированной оценки качества произношения слогов без предварительной нормализации и сглаживания.

Заключение

В работе рассмотрено использование алгоритма DTW для временной трансформации записей для подсчета количественной оценки качества произношения слогов в процессе речевой реабилитации. Проведено сравнение оценок, получаемых на основе предлагаемых мер различия, для использования в качестве количественной оценки предложено DTW-расстояние, обладающие наименьшим количеством ошибок для сравниваемых пар. Применение нормализации по интенсивности и сглаживания к временным последовательностям перед применением DTW показывает результат хуже, чем применение DTW к первоначальным последовательностям.

Время подсчета оценки для одной пары записей в среднем составляет 3 с, что, несомненно, быстрее, чем ручное проставление оценок, однако для реализации биологической обратной связи появляется

необходимость сокращения времени подсчета, что может потребовать либо оптимизацию программного кода, либо переработку самого алгоритма (как вариант, применение не классического DTW, а ускоренного DTW).

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект «Восстановление речевой функции с использованием технических методов и математического моделирования у больных раком полости рта и ротоглотки после хирургического лечения», № 1615-00038.

Литература

1. Злокачественные новообразования в России в 2016 г. (заболеваемость и смертность) / Под ред. А.Д. Каприна, В.В. Старинского, Г.В. Петровой. – М.: МНИОИ им. П.А. Герцена, 2018. – 250 с.
2. Состояние онкологической помощи населению России в 2016 году / под ред. А.Д. Каприна, В.В. Старинского, Г.В. Петровой. – М.: МНИОИ им. П.А. Герцена, 2017. – 236 с.
3. ГОСТ Р 50840–95. Передача речи по трактам связи. Методы оценки качества, разборчивости и узнаваемости. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1996. – 234 с.
4. Model of system quality assessment pronouncing phonemes / Е.Ю. Костюченко, Д.И. Игнатъева, Р.В. Мещеряков и др. // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). – 2016 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7819016/>, свободный (дата обращения: 26.11.2017).
5. Романенко А.А. Выравнивание временных рядов: прогнозирование с использованием DTW / А.А. Романенко // Машинное обучение и анализ данных. – 2001. – № 1 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://jmla.org/papers/doc/2011/no1/Romanenko2011Dynamic.pdf> (дата обращения: 26.11.2017).
6. Теслер Г.С. Метрики и нормы в иерархии категориальных семантик и функций // Математические машины и системы. – 2005. – № 2 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://elektronika.vk.ru/4\(28\)2008/4.html](http://elektronika.vk.ru/4(28)2008/4.html), свободный (дата обращения: 26.11.2017).
7. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. пособие для вузов. – 10-е изд., стереот. – М.: Высшая школа, 2004. – 479 с.

8. Correlation normalization of syllables and comparative evaluation of pronunciation quality in speech rehabilitation / E. Kostyuchenko, R. Meshcheryakov, D. Ignatieva et al. // 19th International conference on speech and computer SPECOM 2017, Lecture Notes in Computer Science. Springer, Cham. – 2017. – Vol. 10458. – P. 262–271.

9. Новикова Н.В. Прогнозирование национальной экономики: учеб.-метод. пособие / Н.В. Новикова, О.Г. Поздеева. – Екатеринбург: Урал. гос. экон. ун-т, 2007. – 137 с.

Новохрестова Дарья Игоревна

Студентка каф. безопасности информационных систем ТУСУРа

Тел.: +7 (382-2) 70-15-29 (внутр. 29-66)

Эл. почта: ndi@fb.tusur.ru

Novokhrestova D.I.

Time normalization of syllables with the dynamic time warping algorithm in assessing of syllables pronunciation quality when speaking

The article is devoted to the problem of time normalization of syllable records before the comparative evaluation of the pronunciation quality. The dynamic time warping (DTW) algorithm is used for time normalization. A comparison is made of quantitative estimates of the syllables pronunciation quality. Estimates are calculated on the basis of the DTW-distance, the Minkowski metric with a parameter value of 3 and the correlation coefficient. A conclusion is made about applicability of DTW for time normalization of syllables for evaluating intelligibility in the process of speech rehabilitation. As the final evaluation of the pronunciation quality the DTW-distance was chosen obtained on the basis of the algorithm without preliminary normalization and smoothing.

Keywords: speech quality estimation, syllables pronunciation quality, time normalization, DTW.

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 621.311.62

Д.А. Корольский, Г.Я. Михальченко, С.Г. Михальченко

Формирование постоянного тока в источниках питания светодиодных светильников повышенной надежности

Рассмотрен принцип формирования постоянного тока в нагрузке источника питания светодиодного светильника без использования на входе сглаживающего конденсатора большой емкости. Построена математическая модель силовой цепи, получены аналитические выражения токов и напряжений ее схемы замещения и установлены закономерности формирования модулирующих воздействий в системе управления преобразователями.

Ключевые слова: источник питания, светодиодный светильник, электролитический конденсатор, накопительный конденсатор, реверсивный преобразователь, модуляционная функция.

doi: 10.21293/1818-0442-2017-20-4-149-154

Активные исследования в области полупроводниковой светотехники привели к широкому распространению светодиодных светильников в силу их высокого потенциала по удельной плотности светового потока, энергоэффективности и надежности в сравнении со светильниками других типов [1, 2]. Массовое применение такого рода осветительной техники при питании светодиодов от однофазной сети переменного тока через драйверы позволило выявить и целый ряд проблемных ситуаций, не позволяющих полностью использовать упомянутый потенциал. Во-первых, в традиционных структурах драйверов для сглаживания выпрямленного напряжения используются электролитические конденсаторы большой емкости, в то время как их срок службы на порядок ниже такового самих светодиодов. Кроме того, сетевой выпрямитель с емкостным фильтром характеризуется низкой электромагнитной совместимостью с питающей сетью. Во-вторых, использование транзисторов с «жесткой» коммутацией приводит к ускорению деградации полупроводниковых кристаллов, снижению срока службы драйверов и коэффициента полезного действия светильника. В связи с этим в настоящее время проводятся исследования и разработки источников питания, силовые цепи которых используют пленочные конденсаторы малой емкости.

Такие источники имеют общий принцип формирования постоянного тока в светодиодах, который заключается в периодическом запасании энергии в накопительном конденсаторе малой емкости и отдаче ее в нагрузку в оставшуюся часть периода выпрямленного напряжения питающей сети. Напряжение на нагрузке поддерживается стабильным за счет дополнительного источника импульсно-модуляционного типа. При этом емкость накопительного конденсатора может быть уменьшена настолько, чтобы соблюдалось главное условие – напряжение на нем должно оставаться выше напряжения нагрузки. Снижение емкости позволяет использовать пленочный или керамический конденсатор вместо электролитического без снижения срока службы драйвера и значительного увеличения габаритных размеров [3, 4].

Базовый вариант схемы силовой цепи одного из таких источников питания представлен на рис. 1 [4].

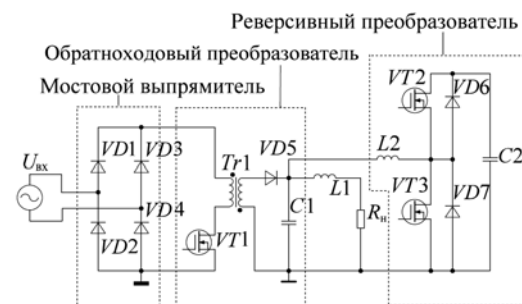


Рис. 1. Структура силовой цепи преобразователя повышенной надежности

Преобразователь содержит мостовой выпрямитель и два каскада. Обратный преобразователь (ОХП) первого каскада осуществляет приведение выпрямленного напряжения сети к требуемому напряжению нагрузки. Второй каскад – реверсивный преобразователь (РП) – работает в текущий момент времени в режиме повышающего или понижающего преобразователя в зависимости от реализации функций накопления или отдачи энергии в нагрузку.

В схеме на рис. 1 приняты следующие обозначения: $VD1-VD4$ – диоды выпрямительного моста; $VT1$ – транзистор обратного преобразователя; $Tr1$ – трансформатор; $VD5$ – диод выходного выпрямителя; $C1$ – емкость фильтра ОХП; $L1$ – индуктивность фильтра тока нагрузки; R_n – сопротивление нагрузки; $VT2$ и $VT3$ – транзисторы РП с обратными диодами $VD6$ и $VD7$ соответственно; $L2$ – индуктивность входного дросселя РП; $C2$ – емкость накопительного конденсатора.

Режим работы реверсивного преобразователя зависит от относительной длительности импульсов на затворах транзисторов $VT2$ и $VT3$, которые работают в противотакте. В зависимости от направления тока дросселя $L2$ один из транзисторов $VT2$ или $VT3$ находится в закрытом состоянии. В это время ток проводит его обратный диод $VD6$ или $VD7$ соответственно.

В отечественной и зарубежной литературе описаны лишь некоторые принципы формирования постоянного тока нагрузки в различных преобразователях, использующих конденсаторы малой емкости [5–7], но не проводится анализ электромагнит-

ных процессов. Целью данной статьи является исследование электромагнитных процессов преобразователя по рис. 1 и установление закономерностей изменения модуляционных функции обратноходового и реверсивного преобразователей.

Схема замещения ОХП

Принцип работы классического обратноходового преобразователя (рис. 2) при питании его от источника постоянного напряжения и анализ электромагнитных процессов в режиме непрерывных токов рассмотрены на достаточно высоком уровне в отечественной и зарубежной литературе [8–10].

В рамках настоящей статьи процессы в схеме замещения ОХП по рис. 2 рассматриваются при питании его выпрямленным напряжением с сохранением синусоидальной огибающей. Конденсатор C выбирается небольшой емкости с целью обеспечения корректной коммутации диодов выпрямителя и ключа $S1$.

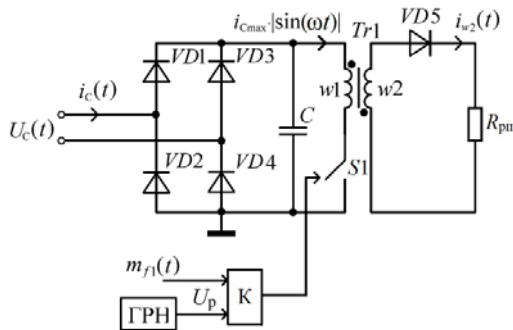


Рис. 2. Схема замещения обратноходового преобразователя

Диоды входного выпрямителя $VD1–VD4$ и ключ $S1$ в первичной цепи трансформатора $Tr1$ представлены идеальными элементами без потерь. Величина индуктивности первичной обмотки трансформатора $Tr1$ рассчитывается таким образом, чтобы обеспечить работу ОХП в режиме прерывистых токов, как показано на временных диаграммах (рис. 3).

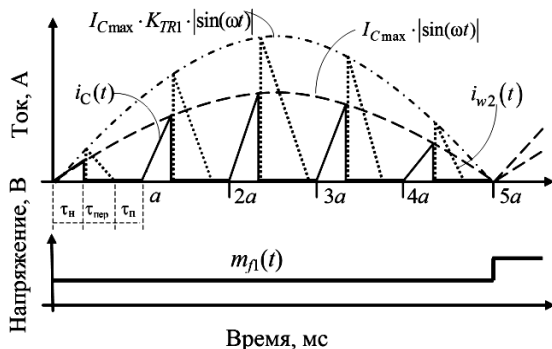


Рис. 3. Принцип построения модуляционной функции обратноходового преобразователя

Здесь обозначено: I_{Cmax} – амплитуда синусоидальной огибающей потребляемого из сети импульсного тока; $I_{Cmax}K_{TR1}$ – амплитуда синусоидальной огибающей импульсного тока вторичной обмотки трансформатора $Tr1$; K_{TR1} – коэффициент трансформации; $i_c(t)$ – ток, потребляемый из сети; $i_{w2}(t)$ – ток вторичной обмот-

ки трансформатора $Tr1$; ω – круговая частота питающей сети; $m_n(t)$ – модуляционная функция, поступающая на вход компаратора K (см. рис. 2). Под модуляционной функцией понимается сигнал управления, который сравнивается в компараторе с развертывающим напряжением.

Если обеспечить постоянство длительностей импульсов замкнутого состояния ключа $S1$ на полупериоде напряжения питающей сети, то амплитуда треугольных импульсов тока сети $i_c(t)$ сохранит синусоидальную огибающую, как показано на рис. 3 пунктирной линией.

Естественно, и импульсный ток $i_{w2}(t)$ вторичной обмотки $Tr1$ сохранит синусоидальную огибающую и будет отличаться в коэффициент трансформации раз. Данный режим может быть реализован при синусоидальности напряжения сети и ограничении относительной длительности импульса, не превышающем половины тактового интервала ($0 < \gamma < 0,5$).

Такой режим работы ОХП позволяет реализовать мягкую коммутацию транзистора и обеспечить практически нулевой сдвиг по фазе входного тока от входного напряжения.

Математическая модель ОХП

Задача проектирования обратноходового преобразователя сводится к получению синусоидального потребляемого из сети тока, а это достижимо только тогда, когда огибающая выходного тока мостового выпрямителя $VD1–VD4$ будет изменяться по закону модуль-синуса (см. рис. 3), а его усредненное значение на каждом периоде коммутации ключа равно

$$i_{c\text{ ср}}(t) = I_{Cmax} \cdot \frac{\tau_H}{2 \cdot a} \cdot |\sin(\omega t)|, \quad (1)$$

где I_{Cmax} – амплитудное значение тока $i_c(t)$; τ_H – интервал времени, в течение которого ток накапливается в индуктивности первичной обмотки $Tr1$; a – период коммутации ключа $S1$.

Тактовый период широтно-импульсной модуляции a распадается, как показано на рис. 3, на три интервала:

$$\frac{\tau_H}{a} + \frac{\tau_{\text{пер}}}{a} + \frac{\tau_{\text{п}}}{a} = 1, \quad (2)$$

где $\tau_{\text{пер}}$ – интервал передачи энергии в нагрузку; $\tau_{\text{п}}$ – пауза, в течение которой ток обеих обмоток трансформатора $Tr1$ равен нулю.

Как отмечалось ранее, условием, при котором огибающая тока вторичной обмотки ОХП, обозначенная на рис. 2 как $i_{w2}(t)$, изменяется по закону модуль-синуса

$$i_{w2}(t) = \frac{I_{Cmax}}{2} \cdot \left(1 - \frac{\tau_H}{a} - \frac{\tau_{\text{п}}}{a}\right) \cdot |\sin(\omega t)| \cdot K_{TR1}, \quad (3)$$

является неизменность длительности управляющих импульсов ключа $S1$ на полупериоде напряжения сети.

При этом коммутационная функция (импульсная последовательность на выходе компаратора) будет изменяться следующим образом [11–13]:

$$K_F(\xi) = \frac{1}{2} \cdot (1 + \text{sign}(\xi)), \quad (4)$$

здесь $\text{sign}(\xi)$ – сигнум-функция, принимающая значение 0, 1 или -1 в зависимости от знака аргумента.

Аргумент сигнум-функции из (4) строится по выражению

$$\xi = m_{f1}(t) - U_p(t). \quad (5)$$

Напряжение U_p в свою очередь можно представить следующим образом:

$$U_p(t) = U_{pm} \cdot \left(\frac{t}{a} - E_1 \left[\frac{t}{a} \right] \right), \quad (6)$$

где $E_1 \left[\frac{t}{a} \right]$ – целая часть от $\frac{t}{a}$, U_{pm} – амплитуда развертывающего пилообразного напряжения.

Схема замещения РП

Поскольку ОХП представляет собой источник импульсного тока, то на схеме замещения РП (рис. 4) входной источник энергии можно заменить источником тока $i_{вх}(t)$, численное значение которого равно усредненному значению $i_{w2}(t)$ из (3).

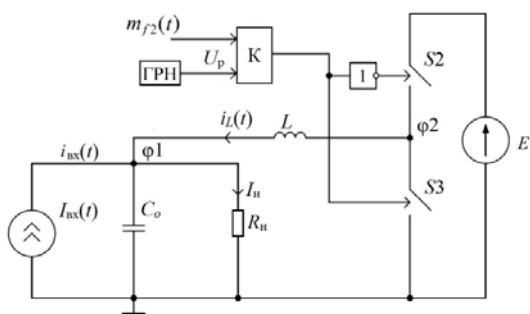


Рис. 4. Схема замещения реверсивного преобразователя

В схеме замещения обозначено: C_o – емкость фильтра источника тока; $S2, S3$ – силовые ключи; U_p – развертывающее пилообразное либо треугольное напряжение; $m_{f2}(t)$ – модуляционная функция, которая будет получена ниже; E – источник постоянного напряжения.

Здесь приняты следующие допущения: накопительный конденсатор $C2$ (см. рис. 1) заменен на источник постоянного напряжения E , а для получения аналитических выражений модуляционной функции пренебрежем пульсациями напряжения ($E = U_{C2cp}$).

Математическая модель РП

Для установления аналитических зависимостей связи токов в узле $\phi1$, получения закономерности изменения тока $i_L(t)$ и модулирующих функций ключей $S2$ и $S3$ заменим модуль-функцию на функцию квадрата синуса той же частоты. В результате получим среднее значение входного тока:

$$i_{вх}(t) = I_{вх2m} \cdot \sin^2(\omega \cdot t). \quad (7)$$

Если решена основная задача светодиодного источника питания – обеспечение нагрузки постоянным током I_n , то, пренебрегая высокочастотными пульсациями тока конденсатора C_o , можно утверждать, что напряжение на этом конденсаторе должно

быть постоянным: $U_{C_o} = \text{const}$. Из этого следует, что и ток конденсатора C_o должен быть равен нулю: $I_{C_o} = 0$. Эти допущения позволяют перейти к упрощенной схеме замещения, представленной на рис. 5, на которой ветвь с конденсатором C_o удалена, а РП заменен импульсным источником напряжения на ключе $S3 - U_{S3}(t)$.

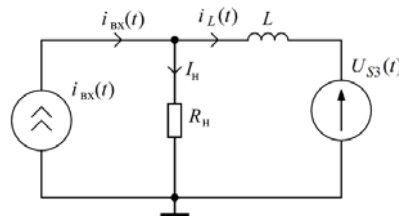


Рис. 5. Упрощенная схема замещения реверсивного преобразователя

Здесь сумма токов в узле $\phi1$ определяется выражением

$$i_{вх}(t) = I_n + i_L(t), \quad (8)$$

где I_n – ток нагрузки; $i_L(t)$ – действующее значение тока дросселя L .

Используя одно из тригонометрических выражений, несложно получить требуемое соотношение между токами в узле $\phi1$ такое, чтобы сформировать постоянный ток в нагрузке:

$$I_{вх2m} \sin^2(\omega t) = I_n - I_{Lmax} \cos(2\omega t), \quad (9)$$

где I_{Lmax} – амплитуда тока дросселя L .

При этом $I_{вх2m} = 2I_n = 2I_{Lmax}$.

Далее установим закон управления ключами $S2, S3$ в схеме замещения на рис. 4 таким образом, чтобы ток источника тока $i_{вх}(t)$ и ток дросселя L соответствовали равенству (9).

Из выражения (9) следует, что ток дросселя будет изменяться следующим образом:

$$i_L(t) = I_{Lmax} \cdot [-\cos(2\omega t)]. \quad (10)$$

Зная закон изменения тока в дросселе L , можем определить напряжение на нем $U_L(t)$:

$$U_L(t) = L \cdot \frac{di_L}{dt} = L \cdot \frac{d(I_{Lmax} \cdot [-\cos(2\omega t)])}{dt} = 2L \cdot I_{Lmax} \omega \cdot [-\sin(2\omega t)]. \quad (11)$$

Напряжение U_{S3} на ключе $S3$ является суммой падения напряжения U_L на дросселе L и напряжения нагрузки U_{Rn} :

$$U_{S2}(t) = U_L(t) + U_{Rn}. \quad (12)$$

Напряжение нагрузки U_{Rn} формируется под воздействием входного тока $i_{вх}(t)$ и тока дросселя $i_L(t)$ следующим образом:

$$U_{Rn} = (i_{вх}(t) + i_L(t)) \cdot R_n = (I_{вх2m} \cdot \sin^2(\omega t) + I_{Lmax} \cdot \cos(2\omega t)) \cdot R_n = \frac{1}{2} \cdot R_n \cdot I_{вх2m}. \quad (13)$$

Подставив (11) и (13) в (12), получим

$$U_{S2}(t) = \frac{R_n}{2} \cdot I_{вх2m} - L \cdot I_{вх2m} \cdot \omega \cdot \sin(2\omega t). \quad (14)$$

Возвращаясь к схеме замещения на рис. 4, можно видеть, что выражение (14) описывает изменение напряжения на ключе $S3$ и определяет усредненное

значение напряжения, которое необходимо сформировать в точке $\varphi 2$ для получения требуемого тока дросселя L .

Для получения изменения напряжения на ключе $S3$ по закону (14) модулирующая функция $m_{f2}(t)$ должна изменяться по закону синуса:

$$m_{f2}(t) = \lambda \cdot [-\sin(2\omega t)], \quad (15)$$

здесь λ – амплитуда синусоидальной составляющей модулирующей функции.

Выражение (15) после приведения к развертывающему напряжению U_p будет иметь следующий вид:

$$m_{f2}(t) = \frac{U_{pm}}{2} - \lambda \cdot \sin(2\omega t). \quad (16)$$

Таким образом, для получения постоянного тока в нагрузке необходимо сформировать модулирующую функцию $m_{f2}(t)$ по закону (16).

Результаты имитационного моделирования процессов в РП с $m_{f2}(t)$, изменяющейся по закону $[-\sin(\omega t)]$

Параметры реактивных компонентов схемы замещения (см. рис. 4) имеют следующие значения: $L = 3$ мГн; $C_0 = 1$ мкФ. Сопротивление нагрузки R_n составляет 20 Ом. Амплитуда тока $I_{вх2m} = 5$ А. Величина напряжения E составляет 100 В.

На рис. 6 представлены временные диаграммы тока $i_{вх2}(t)$, тока дросселя L и тока нагрузки I_n , полученные в численном эксперименте в среде моделирования LTSpice (Linear Technology Corporation) [14] при указанных параметрах. Модель построена в соответствии со схемой замещения, приведенной на рис. 4.

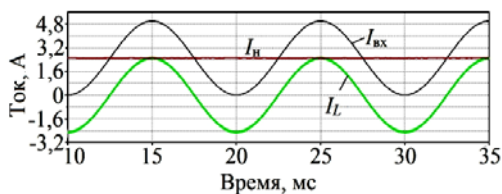


Рис. 6. Временные диаграммы токов в схеме замещения РП

На рис. 7 приведена временная диаграмма модулирующего напряжения, заданная в соответствии с модулирующей функцией $m_{f2}(t)$.

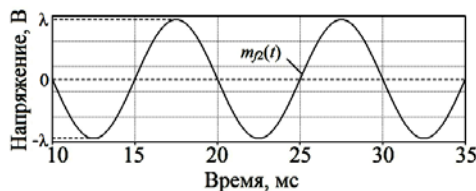


Рис. 7. Временная диаграмма модулирующего напряжения схемы замещения РП в соответствии с модулирующей функцией $m_{f2}(t)$

Временные диаграммы на рис. 6 и 7 получены при моделировании процессов схемы замещения с входным источником тока, изменяющимся по выражению $I_{вх2m} \sin^2(\omega t)$, аналогично [15, 16] и подтверждают верность полученных аналитических зависимостей для преобразователя с разомкнутой системой управления, правильность описания про-

текающих в преобразователе электромагнитных процессов. Ток дросселя $i_L(t)$ изменяется синфазно с входным током $i_{вх}(t)$, с той же частотой и отличается от него амплитудой, соответствующей току нагрузки I_n . При изменении входного тока $i_{вх}(t)$ от 0 до 5 А, ток нагрузки равен 2,5 А, а диапазон изменения тока $i_L(t)$ составляет от $-2,5$ до 2,5 А.

Основываясь на полученных аналитических выражениях и временных диаграммах, перейдем к описанию модулирующей функции при изменении входного тока $i_{вх}(t)$ по закону модуль-синуса. Сумма токов в узле $\varphi 1$ также будет определяться в соответствии с выражением (8). С учетом (1) выразим из формулы (8) ток дросселя L :

$$i_L(t) = I_{вх2m} \cdot |\sin(\omega t)| - I_n. \quad (17)$$

Амплитуда тока дросселя L равна току нагрузки I_n . Напряжение дросселя U_L определяем по формуле

$$U_{Lm} = X_L \cdot I_{Lm} = \omega \cdot L \cdot I_{Lm}. \quad (18)$$

Зная закон изменения тока дросселя L , а также то, что напряжение $U_L(t)$ сдвинуто от тока $I_L(t)$ на 90° , можем определить закон изменения этого напряжения:

$$U_L(t) = \omega \cdot L \cdot (I_{вх2m} \cdot \cos(\omega t) - I_n). \quad (19)$$

Далее по аналогии с выражениями (12)–(14) можно определить изменение напряжения на ключе $S3$

$$U_{S3} = \omega \cdot L \cdot I_{вх2m} \cdot |\cos(\omega t)| - \omega \cdot L \cdot I_n + I_n \cdot R_n \quad (20)$$

При этом модулирующая функция $m_{f2}(t)$ ключей $S2$ и $S3$, которая должна быть сформирована системой управления, изменяется по следующему закону:

$$m_{f2}(t) = \chi \cdot |\cos(\omega t)| - \frac{\chi}{2}, \quad (21)$$

где χ – амплитуда косинусоидальной составляющей модулирующей функции.

После приведения (21) к развертывающему напряжению, модулирующая функция запишется следующим образом:

$$m_{f2}(t) = \chi \cdot \left(|\cos(\omega t)| - \frac{1}{2} \right) + \frac{U_{pm}}{2}. \quad (22)$$

Результаты имитационного моделирования процессов в РП с $m_{f2}(t)$, изменяющейся по закону $|\cos(\omega t)| - 0,5$

На рис. 8 приведены временные диаграммы тока нагрузки, входного тока и тока дросселя L в схеме замещения с заданным модулирующим воздействием. Параметры схемы замещения остались неизменными за исключением индуктивности дросселя L . Ее величина составляет 300 мкГн. Размах переменной составляющей тока I_L составляет около 1 А. Моделирование также проводилось в среде LTSpice.

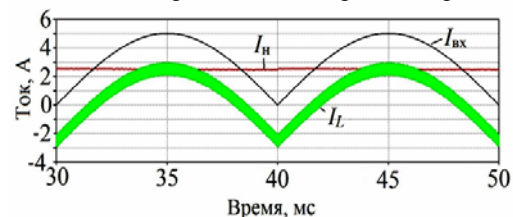


Рис. 8. Временные диаграммы схемы замещения РП при изменении входного тока по закону «модуль синуса»

Закономерность изменения тока $i_L(t)$ подчиняется полученному ранее выражению (17), что гарантирует высокий коэффициент мощности и обеспечивает высокую электромагнитную совместимость источника питания с питающей сетью.

Коэффициент полезного действия преобразователя при $I_H = 0,25$ А, $U_H = 20$ В изменяется от 90,5 до 89,9% в диапазоне изменения входного напряжения от 100 до 220 В, что на 2% выше показателей классического корректора коэффициента мощности за счет применения мягкой коммутации ключа S1.

Заключение

Получены основные аналитические выражения, описывающие электромагнитные процессы реверсивного преобразователя, а также условия обеспечения постоянного тока нагрузки. Установлена закономерность изменения модулирующего воздействия ОХП, которое на полупериоде напряжения сети должно оставаться постоянной величиной: $m_{f1}(t) = \text{const}$. Также установлена закономерность изменения модулирующего воздействия РП, определяемая выражением $m_{f2}(t) = |\cos(\omega \cdot t)| - \frac{1}{2}$.

Управление источником питания светодиодного светильника в соответствии с установленными закономерностями позволяет получить следующие эффекты:

- ток нагрузки является постоянным, и как следствие отсутствуют пульсации светового потока;
- форма потребляемого из сети тока является синусоидальной, что обеспечивает высокий коэффициент мощности и высокую электромагнитную совместимость источника питания с питающей сетью;
- работа транзистора обратногоходового преобразователя VT1 происходит в режиме мягкой коммутации, что повышает долговечность работы полупроводниковых элементов схемы.

Литература

1. Махлин А. Особенности проектирования блока питания для светодиодных ламп // Полупроводниковая светотехника. – 2011. – № 1. – С. 30–33.
2. Сравнение светодиодных ламп с люминесцентными, галогенными и лампами накаливания [Электронный ресурс]. – Электрон. текст. и граф. данные. – Режим доступа: http://svetlix.ru/articles/lamps_comparison
3. Корольский Д.А. Сравнительный анализ методов снижения низкочастотных пульсаций тока источников питания светодиодных светильников без использования электролитических конденсаторов / Д.А. Корольский, С.Г. Михальченко // Сб. науч. тр. XIII Междунар. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых / Национальный исследоват. Том. политехн. ун-т. – Томск, 2016. – С. 69–71.
4. Shu W. A Flicker-Free Electrolytic Capacitor-Less AC-DC LED Driver / W. Shu, X. Ruan, K. Yao // Journal IEEE Transaction on Power Electronics. – 2011. – Vol. 27, No. 11. – P. 4540–4548.
5. Chen Wu Elimination of an Electrolytic Capacitor in AC/DC Light-Emitting Diode (LED) Driver With High Input Power Factor and Constant Output Current / Wu Chen,

S.Y. Ron Hui // Journal IEEE Transaction on Power Electronics. – 2011. – Vol. 27, No. 3. – P. 1598–1607.

6. Lam John C.W. Isolated AC/DC Offline High Power Factor Single-switch LED Drivers without Electrolytic Capacitors / John C.W. Lam, Praveen K. Jain // IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. – 2015. – Vol. 3, No. 3. – P. 679–690.

7. Lam John C.W. A High Power Factor Electrolytic Capacitor-Less AC-Input LED Driver Topology With High Frequency Pulsating Output Current / John C.W. Lam, Praveen K. Jain // Journal IEEE Transaction on Power Electronics. – 2014. – Vol. 30, No. 2. – P. 943–955.

8. Мелешин В.И. Транзисторная преобразовательная техника. – М.: Техносфера, 2005. – 632 с.

9. Papanikolaou N.P. Minimization of power losses in PFC flyback converters operating in the continuous conduction mode / N.P. Papanikolaou, E.C. Tatakis // Journal IEE Proceedings – Electric Power Applications. – 2002. – Vol. 149, No. 4. – P. 283–291.

10. Бородин К.В. Оценка нелинейных динамических свойств полупроводниковых преобразователей с дозированием энергии по коэффициентам пульсаций тока и напряжения / К.В. Бородин, Г.Я. Михальченко, С.Г. Михальченко, В.П. Обрусник // Научный вестник Новосиб. гос. техн. ун-та. – 2012. – № 2. – С. 79–90.

11. Mikhailchenko S.G. Applying a mathematical model for determining power section ratings of a buck-boost converter / S.G. Mikhailchenko, V.I. Apasov // 17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM-2016). – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – P. 507–511.

12. Mikhailchenko S.G. Analysis of resonant converters at wide input voltage range / S.G. Mikhailchenko, A.A. Stolyarova // 17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM-2016). – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – P. 512–517.

13. Михальченко Г.Я. Математические модели импульсных систем преобразования энергии / Г.Я. Михальченко, С.Г. Михальченко. – Томск: Изд-во Том. гос. ун-та систем упр. и радиозлектроники, 2013. – 160 с.

14. Официальный сайт Linear Technology Corporation [Электронный ресурс]. – Метод доступа: <http://www.linear.com/>

15. Mikhailchenko G.Ya. Bifurcation behavior in multi-parallel interleaved buck converter / G.Ya. Mikhailchenko, S.G. Mikhailchenko // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015. – Омск: Изд-во Омск. гос. техн. ун-та, 2015. – P. 1–7.

16. Диксон Р.К. Вопросы линеаризации математической модели преобразователя в системах электропитания, работающих на основе возобновляемых источников энергии // Изв. Том. политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов / Национ. исследоват. Том. политехн. ун-т. – 2017. – Т. 328, № 1. – С. 89–99.

Корольский Даниил Алексеевич

Аспирант каф. промышленной электроники (ПрЭ) ТУСУРа
Тел.: +7-952-804-10-52

Эл. почта: kda455@mail.ru

Михальченко Геннадий Яковлевич

Д-р техн. наук, профессор каф. ПрЭ

Тел.: +7 (382-2) 41-32-32

Эл. почта: kpe-tusur@yandex.ru

Михальченко Сергей Геннадьевич

Д-р техн. наук, профессор каф. ПрЭ

Тел.: +7 (382-2) 41-44-79

Эл. почта: msg@ie.tusur.ru

Korolsky D.A., Mikchalchenko G.Ya., Mikchalchenko S.G.

Direct load current shaping of LED driver with increased reliability

Principle of load current shaping of LED driver without smoothing high capability capacitor at the input is considered. Mathematical model of power circuit is constructed, analytical expressions of currents and voltages for substitution circuit is received and modulating functions in control system of converter is established.

Keywords: power supply, LED, electrolytic capacitor, storage capacitor, reversible converter, modulating function.

СООБЩЕНИЯ

УДК 621.397.7

А.А. Акифьев, Е.В. Зайцева, С.С. Замякин, А.Е. Максимов, И.Н. Пустынский

Исследование и проектирование сглаживающих фильтров в среде Scilab для подавления шумов в изображениях

Представлены возможности использования программного пакета Scilab для расчета характеристик систем активного зрения роботов и разработанные с его помощью функции сглаживающих фильтров для обработки изображений.

Ключевые слова: изображение, шум, зрение роботов, фильтр.

doi: 10.21293/1818-0442-2017-20-4-157-160

При построении программно-аппаратного комплекса активного зрения роботов, способных к функционированию в неструктурированных средах в реальном времени, предполагаются разработка и реализация прецизионных высокопроизводительных методов и средств обработки и распознавания изображений. Одним из этапов такой обработки является сглаживание – одна из наиболее распространенных операций, применяемых при обработке и анализе видеoinформации для устранения помех. Большинство методов сглаживания одновременно приводят к размытию контуров в изображении, поэтому задачи поиска фильтров, которые при достаточно хорошем сглаживании обеспечивали бы сохранение контурных перепадов весьма актуальны. Такие исследования требуют использования программных средств моделирования, тестирования и отладки управляющих программ. Важными параметрами таких программ являются функциональные возможности, ресурсные ограничения, стоимость продукта, лицензионные ограничения, доступность литературы.

MatLab – один из старейших, тщательно проработанных и проверенных временем инженерных пакетов. Однако стоимость MatLab такова, что немногие образовательные и исследовательские учреждения могут позволить себе закупать его.

Scilab является некоммерческим аналогом системы автоматизации математических расчетов MatLab и бесплатным продуктом с открытым исходным кодом. Вычислительные возможности Scilab обеспечены приблизительно тысячью встроенных функций и вполне соответствуют системам компьютерной математики профессионального уровня. Scilab имеет схожий с MatLab интерфейс и синтаксис языка. Scilab можно рассматривать как облегченный вариант MatLab, который сохраняет его основные возможности [1, 2]. Пакет поддерживает основные элементарные и множество специальных функций, применяемых в математике и в инженерных расчетах. К примеру, функция Бесселя, которая используется в аналитическом выражении распределения яркости в кружке рассеяния безабберационного объектива.

SIVP является полезным, эффективным и бесплатным инструментом для обработки изображений и видеоданных для академических исследователей и работает как часть Scilab.

В данной статье авторы представляют разработку и исследование сглаживающего биномиального фильтра обработки изображений, предлагают аналитическую модель фильтра «степени двух» и его реализацию, а также «метод дополнения» как способ повышения качества фильтрации границ изображений.

Изображения в процессе формирования телевизионными измерительными системами обычно подвергаются воздействию различных случайных помех или шумов [3, 4].

Целью восстановления искаженного изображения является получение из него при помощи некоторой обработки изображения, которое близко к идеальному изображению по заданному критерию (рис. 1).

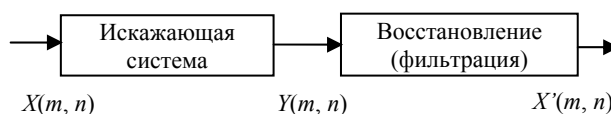


Рис. 1. Схема искажения и фильтрации: $X(m, n)$ – идеальное изображение; $Y(m, n)$ – искаженное изображение; $X'(m, n)$ – восстановленное изображение

Коэффициенты фильтра представляют собой некоторые скалярные значения, на которые умножаются значения цветов пикселей из группы, соответствующей размеру фильтра. Обработка изображения с применением такого рода фильтров описывается следующей формулой [3]:

$$C_{\text{new}}[i][j] = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n a_{ij} C_{\text{old}}[i - \frac{m}{2}][j - \frac{n}{2}],$$

где m и n – это константы фильтра, которые задают двумерный размер фильтра; a – коэффициенты фильтра, определяющие тот эффект, который накладывает фильтр.

Обычно фильтр с неотрицательными коэффициентами обладает сглаживающими свойствами [8–13]. Маски различных фильтров отличаются степенью сглаживания шумов. При увеличении степени сглаживания шумов происходит также подавление высокочастотной составляющей полезного изображения, что вызывает исчезновение мелких деталей и размазывание контуров.

В системе SIVP представлена функция реализации фильтра «Гaussиан»:

$$F_{\text{gauss}}(i, j) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{i^2 + j^2}{2\sigma^2}\right),$$

где σ – степень размытия изображения.

Функция биномиального фильтра в SIVP отсутствует. Биномиальные фильтры содержат значения дискретного биномиального распределения. Эти фильтры строятся с помощью последовательной свертки эквивалентно вычислительной схеме треугольника Паскаля (таблица) [14].

Схема треугольника Паскаля

R	f	Коэффициенты	σ^2
0	1	1	0
1	1/2	1 1	1/4
2	1/4	1 2 1	1/2
3	1/8	1 3 3 1	3/4
4	1/16	1 4 6 4 1	1

В таблице R – порядок бинома; f – масштабный множитель 2^{-R} ; σ^2 – дисперсия. Авторами реализован данный фильтр с возможностью задания размерности матрицы (алгоритм 1.1).

Алгоритм 1.1. Биномиальный фильтр

Входные параметры: переменная n – размерность матричного фильтра.

Результат функции: матричный фильтр заданной размерности.

Особенности: функция принимает только нечетное значение размерности, не превышающее 11. Коэффициент фильтра связан с размерностью.

Функция binom(n)

Если (~modulo(n,2)) тогда f="error";

Если нет(n<3) тогда f="error";

Если нет(n>11) then f="error";

Иначе

Цикл1 i=1:n

Если(i==1) тогда f(i,1)=1;

Если нет(i==2) then f(i,1)=1; f(i,2)=1;

Иначе

Цикл2 j=1:i

Если(j==1) тогда f(i,1)=1;

Если нет(j==i) тогда f(i,j)=1;

Иначе f(i,j)=(f((i-1),(j-1))+f((i-1),j));

endЕсли

endЦикл2

endИначе

endЦикл1

h=f(n,:);

v=h';

f=v*h;

n=(1/(2^(n-1)))^2;

f=n*f;

endИначе

endФункции

Для оценки работы биномиального фильтра возьмём стандартное изображение из базы SIVP, наложим на него помеху «соль и перец» с помощью стандартного оператора imnoise. Обработаем данное изображение биномиальным фильтром размерностью 5×5 .

Для оценки эффективности реализованных фильтров рассчитываем среднеквадратическую ошибку (RMSE):

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{m,n} (A_{m,n} - B_{m,n})^2},$$

где MN – число пикселей изображения; A – исходное изображение; B – обработанное изображение; m – пиксель по строке; n – номер пикселя по столбцу.

RMSE для изображения, обработанного биномиальным фильтром размерностью 5×5 , получается равным 0,0282.

Также рассчитываем пиковое отношение сигнал/шум (PSNR):

$$\text{PSNR} = 20 \log_{10} \frac{|A_{\text{max}}|}{\text{RMSE}(A, B)},$$

где A_{max} – максимальная яркость пикселя изображения A .

Чем больше величина PSNR, тем лучше качество полученного изображения. PSNR для изображения, обработанного биномиальным фильтром размерностью 5×5 , получается равным 78 дБ, что подтверждает эффективную работу фильтра.

Авторы предлагают модифицировать данный фильтр следующим образом:

$$\begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} 1 & 2 & 4 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 8 & 4 & 2 \\ 4 & 8 & 16 & 8 & 4 \\ 2 & 4 & 8 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 4 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

и назвать его фильтром «степени двух» (алгоритм 1.2).

Алгоритм 1.2. Фильтр «степени двух»

Входные параметры: переменная n – размерность матричного фильтра, переменная m – коэффициент фильтра.

Результат функции: матричный фильтр заданной размерности.

Особенности: функция принимает только нечетное значение размерности, не превышающее 21, допускаемое значение коэффициента: от 2(–10) до 20.

Функция index2(n,m)

Если(~modulo(n,2)) then f="error";

Если нет(n<3) then f="error";

Если нет(n>21) then f="error";

Если нет(m<1/1024) then f="error";

Если нет(m>1) then f="error";

Иначе

t=(n+1)/2;

Цикл1 i=1:t;

Цикл2 j=1:t;

f(i,j)=2^(i+j-2);

f(i,(n+1-j))=2^(i+j-2);

f((n+1-i),j)=2^(i+j-2);

f((n+1-i),(n+1-j))=2^(i+j-2);

endЦикл2

endЦикл1

f=m*f;

endИначе

endФункции

Обработаем «зашумленное» изображение фильтром «степени двух» размерностью 5×5 . Для оценки эффективности предложенного фильтра рассчитываем RMSE, которая составила 0,0117, и PSNR = 86 дБ.

Все обработанные изображения получены с применением метода дополнения, который решает проблему граничных условий, которая актуальна для всех матричных фильтров: у верхнего левого пикселя не существует соседнего пикселя справа от него. Эта проблема решается методом дополнения (алгоритм 2), который требует создания промежуточного изображения. Создаётся временное изображение: в центр изображения копируется входная «картинка», а края заполняются крайними пикселями изображения. Размытие применяется к промежуточному буферу, а потом из него извлекается результат.

Алгоритмы 2. Функции реализации метода дополнения

2.1. Определение количества добавляемых строк и столбцов

Входные параметры: матрица m .

Результат функции: количество добавляемых строк и столбцов.

```
function [f]=amount(m)
    f=size(m);
    f=(f(1)-1)/2;
endfunction
```

2.2. Добавление строк и столбцов

Входные параметры: матрица m , переменная s – количество добавляемых строк и столбцов.

Результат функции: обработанная матрица.

Функция add(m,s)

```
t=m(1,:);
Цикл i=1:s
    m=[t,m];
endЦикл
t=m(:,1);
Цикл i=1:s
    m=[t,m];
endЦикл
f=m;
endФункции
```

2.3. Удаление строк и столбцов

Входные параметры: матрица m , переменная s – количество удаляемых строк и столбцов.

Результат функции: обработанная матрица.

Функция del(m,s)

```
Цикл i=1:s
    m(1,:)=[];
    m(:,1)=[];
endЦикл
f=m;
endФункции
```

Для удобства пользователя была реализована основная функция (алгоритм 3), позволяющая выбрать тип фильтра, размерность матрицы, коэффициент фильтра.

Алгоритм 3. Основная функция

Входные параметры: переменная A – коэффициент фильтра; переменная B – размерность матричного фильтра; переменная C – выбор фильтра (1 – «степени двух»; иное – биномиальный фильтр); переменная D – имя файла.

Результат функции: обработанное изображение (вывод на экран и в массив).

Пример задания фильтра:
image(1/32,3,1,'e3.jpg').

Заключение

Изложенные в статье алгоритмы сглаживания изображений показали свою эффективность для подавления шумов изображений. Предложенная модификация биномиального фильтра показала свою эффективность увеличением PSNR, что свидетельствует о повышении качества обработанного изображения. Каждый раз при использовании того или иного фильтра коэффициенты маски фильтра следует подбирать индивидуально исходя из количественных характеристик шума и требований к получаемому изображению. Данные программные реализации позволяют задавать различные коэффициенты фильтрации. Впоследствии полученные модели фильтров и программные реализации планируется использовать на реальных изображениях с системами активного зрения роботов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки РФ по проекту № 8.9562.2017/8.9 и РФФИ в рамках научного проекта № 16-47-700939.

Литература

1. Колкер А.Б. Обоснование выбора программного обеспечения для робототехники / А.Б. Колкер, Д.А. Ливенец, А.И. Кошелева // Автоматика и программная инженерия. – 2012. – №1 (1). – С. 51–64.
2. Желтов С.Ю. Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения. – М.: Физматкнига, 2010. – 672 с.
3. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений. 3-е изд., испр. и доп. / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М.: Техносфера, 2012. – 1104 с.
4. Гоулд Б. Цифровая обработка сигналов / Б. Гоулд, Ч. Рэйдер; пер. с англ. под ред. А.М. Трахтмана. – М.: Сов. радио, 1973. – 438 с.
5. Айфичер Э. Цифровая обработка сигналов. Практический подход. – 2-е изд.; пер. с англ. / Э. Айфичер, Б. Джервис. – М.: Вильямс, 2004. – 992 с.
6. Прэтт У.К. Методы передачи изображений: сокращение избыточности: пер. с англ. / У.К. Прэтт, Д.Д. Сакрисон, Х.Г.Д. Мусманн. – М.: Радио и связь, 1983. – 264 с.
7. Мезенцева О.С. Фильтрация сильно зашумленных изображений / О.С. Мезенцева, А.А. Андреев // Обозрение прикладной и промышленной математики. – 2008. – Т. 15, № 1. – С. 176–178.
8. О математических моделях фильтров для цифровой обработки изображений / Н.И. Червяков, П.А. Ляхов, Д.И. Калита, Н.В. Попова // Основные направления развития научного потенциала в свете современных исследований: теория и практика: матер. XI Междунар. заоч. науч. конф. – Ставрополь, 2017. – С. 238–241.
9. Каменский А.В. Методы повышения четкости телевизионных изображений высокого качества линейными алгоритмами // Доклады ТУСУРа. – 2017. – Т. 20, № 1. – С. 46–49.
10. Капустин В.В. Оценка качества изображений высокого разрешения при внутрикадровом сжатии в стандартах JPEG и JPEG2000 / В.В. Капустин, А.В. Каменский // Доклады ТУСУРа. – 2016. – Т. 19, № 3. – С. 27–31.
11. Дворкович В.П. Цифровые видеоинформационные системы: теория и практика / В.П. Дворкович, А.В. Дворкович. – М.: Техносфера, 2012. – 1008 с.
12. Malanin M.Yu. Optimization of parameters of twodimensional filters of increase of clearness of television images on contrastly to frequency characteristics / M.Yu. Malanin, A.V. Kamenski, M.I. Kuryachiy // Control and Commu-

nications (SIBCON), IEEE 2015 International Siberian Conference on. – 2015. – P. 1–4.

13. Капустин В.В. Коррекция координатных искажений в телевизионно-вычислительных системах // Доклады Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. – 2015. – № 4 (38). – С. 174–177.

14. Дамьяновски В. ССТV. Библия охранного телевидения: пер. с англ. / В. Дамьяновски. – М.: Ай-Эс-Пресс, 2003. – 344 с.

Замякин Сергей Сергеевич

Магистрант каф. ТУ

Тел.: 8-900-922-22-04

Эл. почта: zsergey18@gmail.com

Максимов Александр Евгеньевич

Магистрант каф. ТУ

Тел.: 8-952-888-90-85

Эл. почта: alexander@maximov.net.ru

Пустынский Иван Николаевич

Д-р техн. наук, профессор каф. ТУ

Тел.: (382-2) 41-34-23, 8-923-410-48-87

Эл. адрес: in@tu.tusur.ru

Акифьев Алексей Александрович

Магистрант каф. телевизионных устройств (ТУ) ТУСУРа

Тел.: 8-999-495-00-62

Эл. почта: AkifyevAlex1@gmail.com

Зайцева Екатерина Викторовна

Канд. техн. наук, ст. преподаватель каф. ТУ

Тел.: (382-2) 70-15-04

Эл. адрес: katerinka_zev@mail.ru

Akifyev A.A., Zaytseva E.V., Zamyakin S.S.,

Maximov A.E., Pustynsky I.N.

Realization of the smoothing filters for noise suppression in the Scilab environment

The review of Scilab software package for robots active vision systems calculation and the functions of the smoothing filters realized with this help for images processing is submitted.

Keywords: image, noise, robots active vision systems, filter.

Уважаемые авторы!
С 2016 года изменяется формат печати журнала,
вводятся новые правила и требования к оформлению статьи.

**Требования к подготовке рукописей статей, представляемых для публикации в журнале
«Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники»**

1. Электронный вариант статьи должен быть представлен в виде файла, названного по-русски фамилией первого автора, на дискете или диске в формате Word 2003. Предпочтительнее представить его по электронной почте.

2. Оригинал на бумажном носителе должен полностью соответствовать электронному варианту.

3. Статья должна иметь (в порядке следования): УДК; И.О. Фамилии авторов; заглавие; аннотация (не реферат); ключевые слова; основной текст статьи; список библиографий под подзаголовком «Литература»; сведения об авторах; далее на английском языке: Фамилии авторов И.О., заглавие статьи, аннотацию, ключевые слова. Сведения об авторах включают в себя фамилию, имя, отчество, ученую степень, ученое звание, должность, место работы, телефон, электронный адрес.

4. Текст статьи должен быть размещен в две колонки без принудительных переносов через один интервал шрифтом Times New Roman 10 кегля на одной стороне листа белой писчей бумаги формата А4, без помарок и вставок. Для облегчения форматирования прилагается **шаблон статьи**, который размещен на сайте: **journal.tusur.ru**. Размер статьи со всеми атрибутами должен быть, как правило, не более пяти страниц.

5. Одни и те же символы в тексте, формулах, таблицах и рисунках должны быть единообразными по написанию. Русские и греческие символы набираются прямым шрифтом, а латинские – курсивом, кроме слов, их сокращений, имен функций, программ, фирм и химических формул.

6. Формулы должны быть набраны в формульном редакторе (Equation, MathType) программы Word. Русские буквы, греческие символы, математические знаки (+, -, ×, ∈, =, скобки, ...) и цифры всегда набираются прямым не жирным шрифтом, а переменные (и кривые), обозначенные латинскими буквами или цифрами – курсивом, кроме слов, их сокращений, имен функций, программ, фирм и химических формул (const, input; $\sin x(t_1)$; U_{in} ; $I_{вх}$; T_z ; β_2 ; H_2O , Adobe Acrobat, Cisco и т.д.); векторные величины – жирным, прямо (не курсив) – A_1 , $M(f)$, β . Шаблоны для набора формул необходимо взять из шаблона статьи.

7. Все употребляемые обозначения и сокращения должны быть пояснены.

8. Единицы измерения физических величин должны соответствовать Международной системе единиц (СИ) и написаны по-русски через пробел (х, ГГц; 20 ГГц; T , град; $7^\circ C$). Десятичные числа пишутся через запятую (не точку).

9. Таблицы и рисунки должны иметь тематические заголовки (не повторяющие фразы-ссылки на

них в тексте). (Рис. 1. Название рисунка; Таблица 1. Название таблицы). Большие блоки расшифровки условных обозначений лучше приводить в тексте. Подписи и надписи – Times New Roman, 9 пт, не жирным, не курсивом, переменные – также как и в тексте. На все рисунки и таблицы должны быть ссылки в тексте (... на рис. 3, ... в табл. 2).

10. Рисунки и фотографии должны быть **черно-белыми**, четкими, контрастными, аккуратными, сгруппированными. Графики – не жирно, сетка – четко. Единицы измерения – на русском. Десятичная запятая (не точка). Рисунки могут быть выполнены в программах CorelDraw, Illustrator, Word, Visio и должны давать возможность внесения исправлений.

11. Иллюстрации, должны быть разрешением не менее 600 dpi. Масштаб изображения – 8 или 16,7 см по ширине (при условии читаемости всех надписей, выполненных шрифтом Times New Roman 9 кегля).

12. На все источники, указанные в списке литературы, должны быть ссылки по тексту (нумерация в порядке упоминания, например, [1, 2], [5–7]). Описание источников должно соответствовать ГОСТ 7.1–2003 и ГОСТ Р 7.0.5–2008 и содержать всю необходимую для идентификации источника информацию, а именно: *для неперiodических изданий* – фамилию и инициалы автора, полное название работы, место издания, название издательства, год издания, количество страниц; *для периодических изданий* – фамилию, инициалы автора, полное название работы, название журнала, год выпуска, том, номер, номера страниц (см. примеры оформления библиографий).

Бумажный вариант рукописи статьи должен быть подписан авторами и (для сторонних авторов) иметь сопроводительное письмо на бланке организации.

Плата за публикацию рукописей не взимается.

Материальные претензии авторов, связанные с распространением материалов их статей после опубликования, не принимаются.

Авторы несут полную ответственность за содержание статей и за последствия, связанные с их публикацией.

Контактная информация

Адрес: 634050, Томск, пр. Ленина, 40, 414-ГК.
Эл. почта: vnmas@tusur.ru. Тел.: +7 (382-2) 51-21-21

