

ISSN 1818-0442

DOI: 10.21293/1818-0442

Доклады ТУСУР. 2023 • Том 26, № 3

ДОКЛАДЫ

Томского государственного университета
систем управления и радиоэлектроники

2023 • Том 26, № 3



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

**ДОКЛАДЫ
ТОМСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ
2023, том 26, № 3**

Периодический научный журнал

Выходит 4 раза в год

Основан в 1997 г.

ISSN 1818-0442

DOI: 10.21293/1818-0442

Редакционная коллегия

В.М. Рулевский, д.т.н., доцент, ректор ТУСУРа, научный руководитель направления НИИ АЭМ ТУСУРа, Томск (*гл. редактор*).

А.А. Шелупанов, д.т.н., проф., президент ТУСУРа, заслуженный работник высшей школы РФ, почётный работник науки и техники РФ, дважды лауреат Премии Правительства РФ в области образования, дважды лауреат Премии Правительства РФ в области науки и техники, Томск, <https://orcid.org/0000-0003-2393-6701> (*зам. гл. редактора*).

А.Г. Лошилов, к.т.н., доцент, проректор по научной работе и инновациям, зав. каф. конструирования узлов и деталей радиоэлектронной аппаратуры, ТУСУР, Томск (*зам. гл. редактора*).

В.Н. Масленников, к.т.н., доцент, ТУСУР, Томск (*отв. секретарь*).

М.П. Батура, д.т.н., проф., гл. науч. сотрудник, БГУИР, заслуженный работник образования Республики Беларусь, Минск, Беларусь.

Б.А. Беляев, д.т.н., проф., зав. лабораторией ЭиСВЧЭ, Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, заслуженный изобретатель России, Красноярск.

Ян Браун (Jan G. Brown), PhD, Национальная лаборатория им. Лоуренса, Беркли, Калифорния, США.

С.А. Гаврилов, д.т.н., проф., проректор по НР, НИУ «Московский институт электронной техники» (МИЭТ), лауреат Премии Правительства РФ в области образования, Москва, Россия, <https://orcid.org/0000-0002-2967-272X>.

Ю.П. Ехлаков, д.т.н., проф. каф. автоматизации обработки информации, ТУСУР, заслуженный работник высшей школы РФ, почетный работник высшего профессионального образования РФ, Томск.

Д.П. Зегжда, д.т.н., проф., чл.-корр. РАН, директор института кибербезопасности и защиты информации Санкт-Петербургского политехнического университета, Санкт-Петербург.

В.М. Исаев, д.т.н., первый заместитель директора, Мытищинский НИИ радиоизмерительных приборов, почетный работник науки и техники РФ, почетный работник электронной промышленности, Мытищи, Московская обл.

Г.А. Кобзев, к.т.н., проректор по международному сотрудничеству, ТУСУР, Томск.

А.М. Кориков, д.т.н., проф. каф. автоматизированных систем управления, ТУСУР, заслуженный деятель науки РФ, почетный работник науки и техники РФ, почетный работник высшего профессионального образования РФ, Томск.

Ю.Н. Кульчин, д.ф.-м.н., академик РАН, научный руководитель, Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения РАН, Владивосток.

П.С. Ложников, д.т.н., проф., зав. каф. комплексной защиты информации, главный научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Информационная безопасность» Омского государственного технического университета, Омск.

Н.Д. Малютин, д.т.н., проф., главный научный сотрудник НИИ систем электрической связи (НИИ СЭС), профессор кафедры конструирования узлов и деталей радиоаппаратуры (КУДР) ТУСУРа, Томск.

В.Ш. Меликян (Vazgen Shavarsh Melikyan), д.т.н., проф., чл.-корр. НАН Республики Армения, ЗАО «Синописис Армения», Ереван, Республика Армения, заслуженный деятель науки Республики Армения, Армения, Ереван, <https://orcid.org/0000-0002-1667-6860>.

С.Д. Одинцов, д.ф.-м.н., проф., иностранный член Норвежской академии наук, проф. Института космических исследований, Барселона, Испания.

Е.М. Окс, д.т.н., проф., зав. каф. физики, ТУСУР, зав. лабораторией плазменных источников, Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, <https://orcid.org/0000-0002-9323-0686>.

Э.Д. Павлыгин, к.т.н., зам. ген. директора по науке, ФНПЦ АО «Научно-производственное объединение (НПО) «МАРС», Ульяновск, <https://orcid.org/0000-0002-6255-8865>.

Н.А. Ратахин, д.ф.-м.н., академик РАН, советник директора, Институт сильноточной электроники (ИСЭ) СО РАН, Томск, <https://orcid.org/0000-0002-3820-8777>.

В.К. Сарьян, д.т.н., проф., академик Национальной академии наук (НАН) Республики Армения, Московский физико-технический институт (МФТИ), научный консультант, НИИ радио, заслуженный работник связи РФ, лауреат Государственной премии РФ в области науки и техники, лауреат Премии Правительства РФ в области науки и техники, Москва.

А.Р. Сафин, к.т.н., доц., заведующий кафедрой формирования и обработки радиосигналов НИУ «МЭИ», Москва.

П.Е. Троян, д.т.н., проф., зав. каф. физической электроники, ТУСУР, почётный работник высшего профессионального образования РФ, почётный работник науки и техники РФ, Томск.

И.А. Ходашинский, д.т.н., проф., каф. компьютерных систем в управлении и проектировании (КСУП) ТУСУРа, заведующий лабораторией интеллектуальных систем каф. КСУП, Томск, <https://orcid.org/0000-0002-9355-7638>.

В.В. Шайдунов, д.ф.-м.н., проф., чл.-корр. РАН, зав. отделом, ФГБУН «Институт вычислительного моделирования СО РАН», научный руководитель научного направления «Математическое моделирование», Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (ФИЦ КНЦ СО РАН), Красноярск, <https://orcid.org/0000-0002-7883-5804>.

С.М. Шандаров, д.ф.-м.н., проф., каф. электронных приборов, ТУСУР, заслуженный работник высшей школы РФ, член Оптического общества Америки (OSA), член Международного НТО IEEE/LEOS инженеров по электротехнике и электронике, действительный член Оптического общества им. Д.С. Рождественского, Томск, <https://orcid.org/0000-0001-9308-4458>.

Ю.А. Шурыгин, д.т.н., проф., директор департамента управления и стратегического развития, ТУСУР, научный руководитель НИИ АЭМ ТУСУРа, зав. каф. компьютерных систем в управлении и проектировании, заслуженный деятель науки РФ, лауреат Премии Правительства РФ в области образования, Томск.

Адрес издателя, редакции, типографии: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, ТУСУР, тел. (382-2) 51-21-21
Свидетельство о регистрации СМИ выдано Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства

в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия: ПИ № ФС 77-19130
Учредитель: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
Подписной индекс 20648 в каталоге агентства «Урал-Пресс»: газеты и журналы.

Верстка, техническое редактирование, подготовка оригинал-макета В.М. Бочкаревой. Корректор В.Г. Лихачева.

Подписано в печать 30.09.2023. Выход в свет 18.12.2023. Формат 60×84 1/8. Печ. л. 6,9. Тираж 500. Заказ 24. Цена 316 руб.

Editorial board

- Viktor M. Rulevskiy** Editor in Chief, Rector of TUSUR University, Scientific adviser at the Research Institute of Automation and Electromechanics, TUSUR University (Tomsk), Doctor of Sciences in Engineering.
- Alexander A. Shelupanov** Deputy Editor in Chief, President of TUSUR University, Doctor of Sciences in Engineering, Professor, Honored Worker of Higher School of the Russian Federation, Honorary Worker of Science and Technology of the Russian Federation, Laureate of the Russian Federation Government Prize in Education, Twice Laureate of the Russian Federation Government Prize in Science and Technology (Tomsk), <https://orcid.org/0000-0003-2393-6701>.
- Anton G. Loschilov** Deputy Editor in Chief, Vice-Rector for Research and Innovations of TUSUR University, Head of the Department of Design of Components and Parts of Electronic Equipment, TUSUR University (Tomsk), Candidate of Sciences in Engineering.
- Viktor N. Maslennikov** Executive Secretary of the Editor's Office, TUSUR University (Tomsk), Candidate of Sciences in Engineering.
- Mikhail P. Batura** Chief Researcher of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Belarus), Doctor of Sciences in Engineering, Professor.
- Boris A. Belyaev** Head of the Electrodynamics Department, Institute of Physics SB RAS (Krasnoyarsk), Doctor of Sciences in Engineering.
- Ian G. Brown** PhD in Plasma Physics, Lawrence Berkeley National Laboratories (California, USA).
- Sergei A. Gavrilov** Vice Rector for Research, National Research University of Electronic Technology (MIET, Moscow), Doctor of Sciences in Engineering, Professor.
- Yury P. Ekhlakov** Professor, Department of Data Processing Automation, TUSUR University, Doctor of Sciences in Engineering.
- Dmitry P. Zegzhda** Professor, Corresponding Member of RAS, Director of the Institute of Cybersecurity and Information Protection, St. Petersburg Polytechnic University (St. Petersburg), Doctor of Sciences in Engineering.
- Vyacheslav M. Isaev** First Deputy Director, Mytishchi Research Institute of Radio Measurement Instruments, Doctor of Sciences in Engineering, Mytishchi (Moscow region).
- Gennady A. Kobzev** Vice-Rector for International Cooperation, TUSUR University (Tomsk), Candidate of Sciences in Engineering.
- Anatoly M. Korikov** Professor, Department of Automated Control Systems, TUSUR University (Tomsk), Doctor of Engineering.
- Yury N. Kulchin** Scientific Director, Institute of Automation and Control Processes FEB RAS (Vladivostok), Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Sciences in Physics and Mathematics.
- Pavel S. Lozhnikov** Doctor of Sciences in Engineering, Head of Department «Complex Information Security» at Omsk State Technical University (Omsk), Professor.
- Nikolay D. Malutin** Leading Researcher at the Research Institute of Electrical Communication Systems (SES), Professor of the Department of Design of Units and Components for Radioelectronic Systems, TUSUR University (Tomsk), Doctor of Sciences in Engineering.
- Vazgen Sh. Melikyan** Director, Academic Department of Synopsis Armenia (Yerevan, Armenia), Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Armenia, Doctor of Sciences in Engineering, Professor.
- Sergey D. Odintsov** International Member of the Norwegian Academy of Science and Letters, Professor, Institute of Space Sciences, Barcelona, Spain, Doctor of Sciences in Physics and Mathematics.
- Yefim M. Oks** Head of the Department of Physics, TUSUR University, Doctor of Sciences in Engineering, Professor.
- Eduard D. Pavlygin** First Deputy General Director for Research of Federal Research-and-Production Center JSC R&P Mars (Ulyanovsk), Candidate of Sciences in Engineering.
- Nikolay A. Ratakhin** Director's Advisor at Institute of High Current Electronics, SB RAS, Academician of the Russian Academy of Sciences (Tomsk), Doctor of Sciences in Physics and Mathematics.
- Vilyam K. Saryan** Scientific Adviser at the Research Institute of Radio (Moscow), Academician of the National Academy of Sciences of Armenia, Doctor of Sciences in Engineering, Professor.
- Ansar R. Safin** Associate Professor, Department of Formation and Processing of Radio Signals, National Research University MPEI (Moscow), Candidate of Sciences in Engineering.
- Pavel E. Troyan** Head of Department of Physical Electronics, TUSUR University (Tomsk), Doctor of Sciences in Engineering, Professor.
- Ilya A. Hodashinsky** Professor, Department of Computer Control and Design Systems, Head of the Laboratory of Intelligent Systems, TUSUR University (Tomsk), Doctor of Sciences in Engineering.
- Vladimir V. Shaidurov** Director, Institute of Computational Modeling SB RAS (Krasnoyarsk), Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Sciences in Physics and Mathematics, Professor.
- Stanislav M. Shandarov** Head, Department of Electronic Devices, TUSUR University (Tomsk), Doctor of Sciences in Physics and Mathematics, Professor.
- Yury A. Shurygin** First Vice-Rector of TUSUR University (Tomsk), Doctor of Sciences in Engineering, Professor.

Содержание

ЭЛЕКТРОНИКА, РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

Семенов Э.В., Поздняков В.С., Полторыхин К.М., Березин А.А. Увеличение выходной мощности двухтактных обострителей импульсов на диодах с накоплением заряда	7
Красненко Н.П., Раков Д.С., Раков А.С. Направленные свойства акустической антенны в виде двух пространственно разнесенных фазированных антенных решеток	14
Нечаев В.Г., Загородний А.С., Заблоцкий А.М. Пассивная компенсация температурной нестабильности сверхвысокочастотных диодных детекторов мощности	20
Хмара И.В., Данилов Д.С., Гребенюк В.Н., Загородний А.С., Шарангович С.Н. Сверхширокополосный рpп-диодный диплексерный переключатель на GaAs	27
Гоголев Н.И., Салих А., Брагин Д.С., Дмитриев В.Д. Исследование характеристик усилителя распределенного усиления на основе GaAs-полевых транзисторов	32
Тисленко А.А. Повышение точности построения карт глубин пространства в активно-импульсной телевизионной измерительной системе с использованием цифровой фильтрации изображений	41
Белова Л.И. Подход к определению срока сохраняемости электрорадиоизделий бортовой аппаратуры авиационной техники применительно к установленной модели внешних воздействующих факторов	49

УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА

Солнев И.Б., Савельев А.О. Обзор существующих методов, подходов и технологий в области оценки актуальности и потенциала научно-технических направлений	55
Воробьева А.А., Федосенко М.Ю. Методы интеллектуального анализа данных и обработки естественного языка в управлении роботизированными производственными системами	65
Катаев М.Ю., Карташов Е.Ю., Гейко П.П. Обнаружение лесных пожаров по изображениям, полученным с БПЛА	72

СООБЩЕНИЯ

Носов А.Ф. Применимость систем передачи данных с использованием технологии LoRaWAN.....	83
Требования	89

Contents
ELECTRONICS, RADIO ENGINEERING AND COMMUNICATIONS

Semyonov E.V., Pozdnyakov V.S., Poltorykhin K.M., Berezin A.A. Increasing the Output Power of Two-Stroke Pulse Sharpeners Based on Step Recovery Diodes	7
Krasnenko N.P., Rakov D.S., Rakov A.S. Directional patterns of the acoustic antenna based on two spatially separated phased antenna arrays.....	14
Nechaev V.G., Zagorodny A.S., Zabolotsky A.M. Passive compensation of temperature instability of microwave diode power detectors	20
Khmara I.V., Danilov D.S., Grebenyuk V.N., Zagorodniy A.S., Sharangovich S.N. Ultra-Wideband pin-diode diplexer switch on GaAs.....	27
Gogolev N.I., Salikh A., Bragin D.S., Dmitriev V.D. Study of the characteristics of a distributed gain amplifier based on GaAs field-effect transistors.....	32
Tislenko A.A. Improving the accuracy of depth maps generation in an active-pulse television measuring system using digital image filtering	41
Belova L.I. Approach to the assessment of the storage ability period of electronic components in airborne equipment as applied to the specified model of external impact factors	49

CONTROL, COMPUTER SCIENCE AND INFORMATICS

Soliev I.B., Savelev A.O. Review of existing methods, approaches and technologies in assessing the relevance and potential of scientific and technical areas	55
Vorobeva A.A., Fedosenko M.Y. Methods for data mining and natural language processing in the management of robotic production systems	65
Kataev M.Yu. Kartashov E.Yu., Geiko P.P. Forest fires detection based on image processing obtained using UAV	72

MESSAGES

Nosov A.F. Applicability of data transmission systems with LoRaWAN technology	83
Manuscript requirements	89

**ЭЛЕКТРОНИКА,
РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ**

УДК 621.373

Э.В. Семенов, В.С. Поздняков, К.М. Полторыхин, А.А. Березин

Увеличение выходной мощности двухтактных обострителей импульсов на диодах с накоплением заряда

Предложенные нами двухтактные обострители импульсов характеризуются относительно небольшой выходной мощностью (1,5 Вт). Это ограничивает применение таких обострителей по прямому назначению – для наблюдения малых нелинейных сверхширокополосных откликов от объектов в диагностических, измерительных и локационных системах. В статье рассмотрен способ увеличения выходной мощности обострителя за счет того, что выходной импульс создается не разрядом емкости на нагрузку, а перебросом в нагрузку тока, протекающего через индуктивный накопитель энергии. При ограниченных (источниками смещения) напряжениях в схеме токовое накопление энергии позволяет увеличить выходную мощность обострителя до 3,4 Вт, а скорость нарастания выходного напряжения – с 34 до 46 В/нс.

Ключевые слова: пикосекундные импульсы, обострители, диоды с накоплением заряда, нелинейные импульсные измерения.

DOI: 10.21293/1818-0442-2023-26-3-7-13

Представляется, что методы нелинейных импульсных измерений имеют значительный потенциал развития [1–4]. Они используются для характеристики и построения поведенческих моделей видеоимпульсных цепей [1], позволяют решать задачи по обнаружению латентных дефектов в проводниках и диэлектриках [2], обнаруживать электронные устройства радиолокационными методами [3–4].

Селекция нелинейного отклика на видеоимпульсные сигналы в большинстве случаев выполняется методом сравнения откликов на импульсы разной полярности [3–4]. Для такого тестирования требуются генераторы пар импульсов противоположной полярности [5].

В принципе, генераторы пар импульсов противоположной полярности могут быть структурно построены в двух вариантах. Первый вариант подразумевает использование двух отдельных формирователей импульсов положительной и отрицательной полярности с последующим их суммированием. В такой схеме к сумматору предъявляются весьма жесткие требования по полосе пропускаемых частот, а также по развязке входных портов [6]. В результате сумматор приходится выполнять по мостовой схеме, в которой половина мощности рассеивается на балластном резисторе. В целом схема получается громоздкой и сложной, поэтому такая структура имеет смысл лишь при генерировании импульсов большой мощности (десятки ватт и более).

Второй вариант предполагает использование двух ключей, включенных по переменному току встречно-параллельно и срабатывающих попеременно [5]. В качестве ключей эффективней всего применять диоды с накоплением заряда (ДНЗ).

Однако неактивный на данной фазе работы генератора диод приходится запира́ть отрицательным смещением (для исключения его паразитного срабатывания). В результате амплитуда выходного импульса оказывается заметно меньше напряжения пробоя диодов. Такая схема тем не менее позволяет

генерировать импульсы мощностью до нескольких ватт, что достаточно для ряда задач нелинейных импульсных измерений.

В настоящей работе рассматривается способ увеличения выходной мощности двухтактных обострителей импульсов на диодах с накоплением заряда.

Исходная принципиальная схема двухтактного обострителя импульсов

В исходной схеме двухтактного обострителя импульсов (рис. 1, без индуктивности $L1$) [5] диоды VD1 и VD2 включены встречно-параллельно по переменному току. Запуск обострителя обеспечивается сигналом меандра, который подается на входной порт от генератора импульсов.

Если катод VD1 и анод VD2 заземлить, то работа обострителя будет невозможной, поскольку запира́ние диода VD1 отрицательным входным напряжением будет сразу приводить к открыванию диода VD2. В итоге выходное напряжение на выходе обострителя не превысит прямого напряжения на диодах в их открытом состоянии.

Для увеличения выходного напряжения обострителя импульсов катод VD1 и анод VD2 находятся под постоянным запирающим напряжением U_0 , обусловленным зарядом конденсаторов C1 и C2 прямым током диодов. Стабилизация напряжения на расчетном уровне обеспечивается стабилитронами VD3 и VD4.

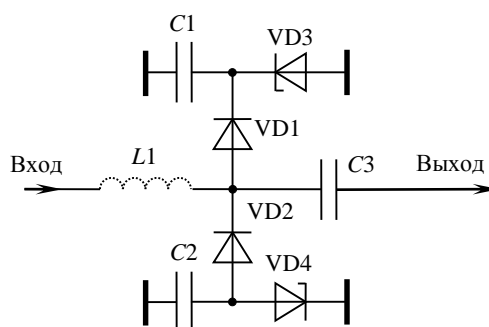


Рис. 1. Исходная схема обострителя импульсов

Значение напряжения U_0 выбирается из условия обеспечения заданного тока накачки ДНЗ I_0 . Он определяется по формуле

$$I_0 = (U_T - U_0 - U_d)/R_T, \quad (1)$$

где U_T и R_T – амплитуда напряжения холостого хода и внутреннее сопротивление генератора меандра, U_d – прямое напряжение на диоде.

В открытом состоянии диода (например, VD1) конденсатор $C3$ заряжен до напряжения $U_0 + U_d$. Сразу после ступенчатого запирающего диода в цепи «генератор меандра – $C3$ – нагрузка» оказывается два источника напряжения – напряжение холостого хода генератора U_T и напряжение на конденсаторе $C3$, равное $U_0 + U_d$. Общее напряжение в цепи оказывается равным $U_T + U_0 + U_d$. Оно приложено к сумме внутреннего сопротивления генератора R_T и сопротивления нагрузки R_n . В результате выходной ток I_n обострителя равен

$$I_n = (U_T + U_0 + U_d)/(R_T + R_n).$$

Соответственно, выходное напряжение U_n в этот момент (равное амплитуде формируемого импульса)

$$U_n = (U_T + U_0 + U_d) R_n / (R_T + R_n). \quad (2)$$

R_n и R_T обычно равны, в результате (2) упрощается

$$U_n = (U_T + U_0 + U_d)/2. \quad (3)$$

Окончательную формулу для выходного напряжения получим, выразив U_0 из (1) с дальнейшей подстановкой в (3):

$$U_n = U_T - I_0 R_T / 2. \quad (4)$$

В [5] использован ДНЗ КД524Б с током накачки 0,02 А. Генератор меандра (National Instruments PXI-5422) имеет напряжение $U_T = 12$ В при $R_T = 50$ Ом. В результате получаем амплитуду выходного напряжения 11,5 В.

Отметим, что амплитуда выходного напряжения на практике оказывается заметно меньше рассчитанной по (4). Это связано с тем, что выключение ДНЗ происходит в момент окончания экстракции из базовой области тех неосновных носителей заряда, которые не успели рекомбинировать или накопиться в дефектах кристаллической решетки (глубоких энергетических центрах).

После выключения ДНЗ продолжается медленный процесс возврата заряда в эмиттер [7]. В результате напряжение U_n достигается не в момент окончания быстрой части фронта, а значительно позже, когда оно уже не дает эффекта импульсного зондирования исследуемого объекта. Графически сказанное иллюстрирует рис. 2.

На нем приведен график выходного сигнала $u_{\text{вых}}(t)$ макета формирователя, выполненного по схеме, представленной на рис. 1 (без индуктивности $L1$). В схеме использованы ДНЗ КД524Б, напряжение стабилизации стабилитронов составляет 10 В, емкость конденсатора $C3$ равна 500 пФ. Максимальное выходное напряжение 11 В достигается лишь спустя 4 нс после начала фронта сигнала. Амплитуда быстрой части фронта составляет 8,7 В (см. рис. 2, кривая 1).

Модификация схемы обострителя импульсов

Рассмотрим компьютерную модель (рис. 3) напряжения на одном из диодов (например, VD2) в окрестности момента выключения другого диода (например, VD1). Видно, что на диоде остается запирающее напряжение, почти равное амплитуде быстрой части фронта импульса. Это значит, что амплитуда фронта импульса в данной схеме может быть практически удвоена без опасности открывания соседнего (не активного на фронте данной полярности) диода. В количественном выражении напряжение на запертом диоде составляет $-(2U_0 + U_d)$. Диод будет открыт только при напряжении U_d . То есть максимальное изменение напряжения на нем составит $2(U_0 + U_d)$. Эта величина почти вдвое превышает вычисленную по (3).

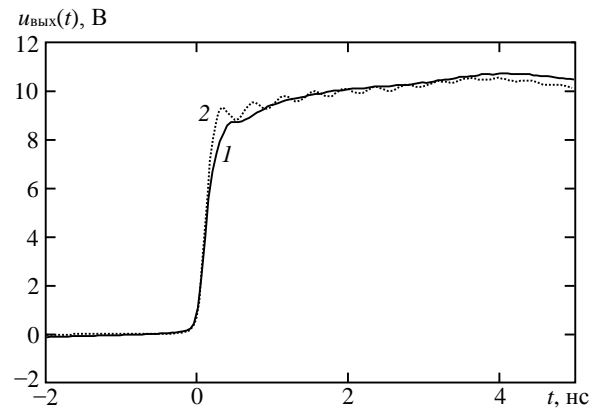


Рис. 2. Выходное напряжение (положительный импульс) исходной схемы формирователя импульсов. Кривые получены при разных вариантах топологической реализации

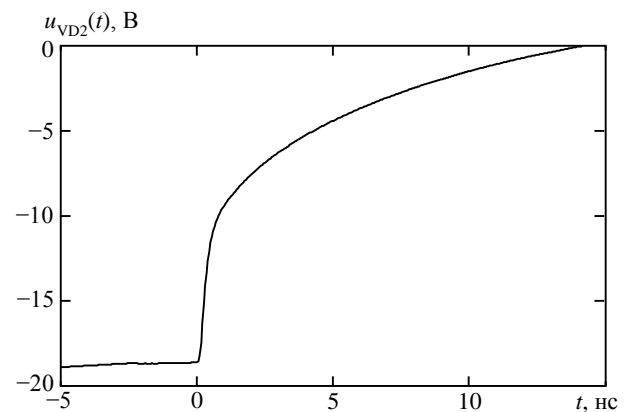


Рис. 3. Напряжение на диоде VD2 в окрестности момента выключения диода VD1

Предлагаемое схемотехническое средство для увеличения амплитуды выходного напряжения основано на том наблюдении, что в рассмотренной схеме ток через открытый диод перед его закрыванием значительно превышает пиковый ток в нагрузке. Действительно пиковый ток нагрузки I_n , исходя из (4), равен

$$I_n = [U_T - I_0 R_T / 2] / R_n.$$

Если $R_n = R_T$, то получим

$$I_n = U_T / R_n - I_0 / 2. \quad (5)$$

Ток через диод перед его запирающим определяется исходя из того, что на всем протяжении, пока диод открыт, напряжение на нем составляет U_d . Поэтому на входе обострителя поддерживается напряжение $U_0 + U_d$ (либо $-(U_0 + U_d)$ на другой фазе). При этом если ток накачки ДНЗ выбран правильно, то напряжение холостого хода генератора в момент выключения диода составляет $-U_r$ (либо U_r на другой фазе). Соответственно, выходной ток генератора I_r (равный току диода) меандра в этот момент равен

$$I_r = (U_0 + U_d + U_r)/R_r. \quad (6)$$

Эта величина примерно вдвое больше, чем вычисленная по (5).

Использовать ток, представленный формулой (6), можно, если установить проходную индуктивность на входе обострителя ($L1$ на рис. 1). В соответствии с законом коммутации ток индуктивности при ступенчатом закрывании диода не изменяется, но перебрасывается в нагрузку обострителя. Соответственно, в нагрузке можно ожидать увеличение напряжения до двух раз по сравнению со схемой без индуктивности.

Применение индуктивных накопителей энергии с последующей их коммутацией ключом на размыкание в принципе известно [8–10], однако в данном случае имеется специфика параметрического синтеза схемы для обеспечения максимальной выходной амплитуды, а также получения монотонного спада импульса.

В частности, установка индуктивности $L1$ при большом значении емкости $C3$ (длинном спаде импульса) приводит к формированию выброса на спаде импульса с постоянной времени разряда индуктивности $L1$ τ_{L1} . Дальнейший спад импульса определяется постоянной времени разряда конденсатора $C3$ τ_{C3} . Поскольку обостритель используется для радиоизмерительных задач, резкий излом на спаде импульса (из-за разницы постоянных времени разряда индуктивности и конденсатора) нежелателен. Отсюда получаем ограничение на верхнее значение емкости $C3$ (и, соответственно, на верхнее значение длительности спада импульса). Представляется допустимым выбрать

$$\tau_{C3} \leq 10 \tau_{L1}. \quad (7)$$

Оборотная сторона установки индуктивности состоит также в том, что максимальный ток в открытом диоде устанавливается за большее время, чем без нее. На протяжении всего времени нарастания тока разряда диода этот диод должен поддерживать себя в открытом состоянии за счет накопленного в нем заряда. Соответственно, заряд диода потребует увеличения за счет увеличения тока накачки. Это достигается путем уменьшения U_0 , вслед за чем ток I_r также несколько уменьшится. Отсюда понятно, что индуктивность следует выбирать минимально достаточной.

Нижняя граница индуктивности $L1$ выбирается исходя из того, чтобы она удерживала ток примерно постоянным на всем протяжении времени выключения диода τ_b . При запертом диоде разряд индуктивно-

сти происходит по цепи с сопротивлением $R_r + R_n$. Отсюда постоянная времени разряда индуктивности составляет

$$\tau_{L1} = L1/(R_r + R_n). \quad (8)$$

Если допустить снижение тока $L1$ за время τ_b не более чем на 20%, то должно выполняться условие $\tau_{L1} \geq 4,5\tau_b$.

Время выключения диодов КД524Б с учетом их параллельного включения составляет около 300 пс. Отсюда, с учетом (8), находим минимально достаточное значение индуктивности $L1$. Оно получается равным 135 нГн.

Для данного значения $L1$ из (7) получаем значение емкости $C3$ не более 135 пФ. Окончательно примем $C3 = 100$ пФ.

Можно рассчитать индуктивность $L1$ и из других соображений. Для каждого ДНЗ существует предельно допустимый ток накачки. В частности, для диодов КД524Б он составляет 0,04 А. Он достигается при определенном значении U_0 (в нашем случае около 9 В). При фиксированном токе накачки индуктивность $L1$ можно выбрать вариационным методом. Ее уменьшение приводит к спаду тока индуктивности за время выключения диода. При увеличении индуктивности ее ток не успевает достигнуть максимального значения за время экстракции заряда, накопленного в ДНЗ при данном токе накачки. В итоге максимум выходного тока будет наблюдаться при некотором оптимальном значении индуктивности.

Выбрать оптимальное значение $L1$ проще на компьютерной модели обострителя. Для того чтобы модель ДНЗ была в данной ситуации адекватной, нужно правильно учитывать время выключения ДНЗ. Как показано в [7], это обеспечивается только неквазистатическими [11–13] моделями диодов. Кроме того, как следует из вышесказанного, для правильного предсказания амплитуды выходного сигнала нужно учитывать количество рекомбинировавшего и накопленного в глубоких энергетических центрах заряда. Это позволяют сделать неквазистатические модели уровня III [7, 11].

Вычислительные эксперименты моделью ДНЗ КД524Б уровня III показывают, что оптимально по значению индуктивности получается достаточно тупой. При изменении $L1$ в пределах 100...200 нГн амплитуда выходного импульса составляет 13,4...13,6 В. На рис. 4 приведена модель выходного импульса при $L1 = 100$ нГн (см. рис. 4, кривая 1). В этом случае мощность импульса (3,6 Вт) оказывается в 2,6 раза больше, чем в этой же схеме без индуктивности $L1$ (1,4 Вт).

Особенности топологической реализации двухтактного обострителя импульсов

Выходной спектр обострителя импульсов достаточно широк (несколько ГГц). Используемые диоды имеют емкость около 3 пФ. Совместно даже с небольшой (несколько нГн) монтажной индуктивностью такая емкость дает резонанс внутри генерируемого спектра частот. Например, индуктивности величиной 1 нГн соответствует резонансная частота

2,9 ГГц. На рис. 2 кривой 2 приведен сигнал на выходе одного из вариантов топологической реализации обострителя, при которой длина печатных проводников между выводами диодов и конденсаторами $C1$ и $C2$ составляла несколько миллиметров. На вершине импульса виден достаточно длинный резонансный цуг.

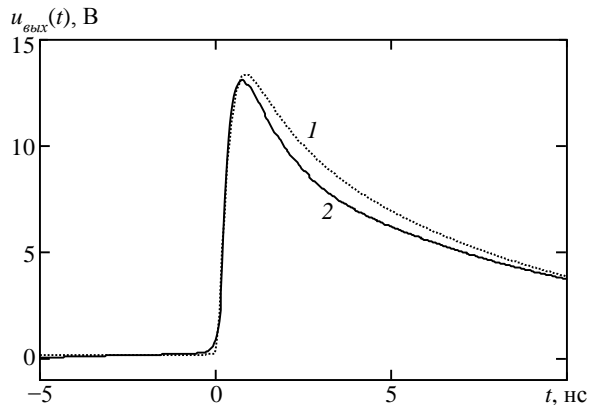


Рис. 4. Выходное напряжение (положительный импульс) двухтактного формирователя импульсов с дополнительной индуктивностью на входе: 1 – модель, 2 – эксперимент

Как видно из кривой 2 на рис. 2, индуктивность диодов и монтажа можно было бы использовать как средство уменьшения длительности фронта. Однако при этом практически не меняется максимальная крутизна сигнала, которая определяет зондирующий эффект в ряде радиоизмерений. Кроме того, параметры наблюдаемого резонансного эффекта сложно контролировать. Они определяются не только добротностью контура «емкость диода – индуктивность», но и тем, что таких контуров два (между резонансами в них возникают интерференционные эффекты). Небольшое отклонение параметров этих контуров друг от друга приводит к значительному изменению амплитуды и положения максимума резонансного цуга. Поэтому гораздо разумней предпринять меры для подавления этих резонансов.

Отметим, что часть паразитной индуктивности является индуктивностью собственно диода. Диоды КД524Б имеют индуктивность около 0,7 нГн [14]. Поэтому во внешней цепи допустима индуктивность не более 0,3 нГн.

Обычно в схемах обострителей импульсов один из выводов диода стараются гальванически соединить с общим проводом для минимизации монтажной индуктивности. В данном случае это невозможно, поскольку на этот вывод подается постоянное запирающее напряжение. Поэтому к конденсаторам $C1$ и $C2$ на рис. 1 предъявляются требования малой индуктивности (не более 0,3 нГн).

Типично индуктивность чип-конденсаторов составляет около 1 нГн [15]. Отсюда понятно, что необходимо включать параллельно как минимум четыре конденсатора. Вариант топологии, реализующий минимальную монтажную индуктивность и индуктивность за счет растекания тока по общему проводу,

представлен на рис. 5. Здесь выводы диодов, на которые подается смещение, выведены на заземленную сторону платы. Конденсаторы $C1$ и $C2$ составлены из четырех параллельно включенных и размещены в виде гроздьев вокруг выводов диода (вместе со стабилитронами).

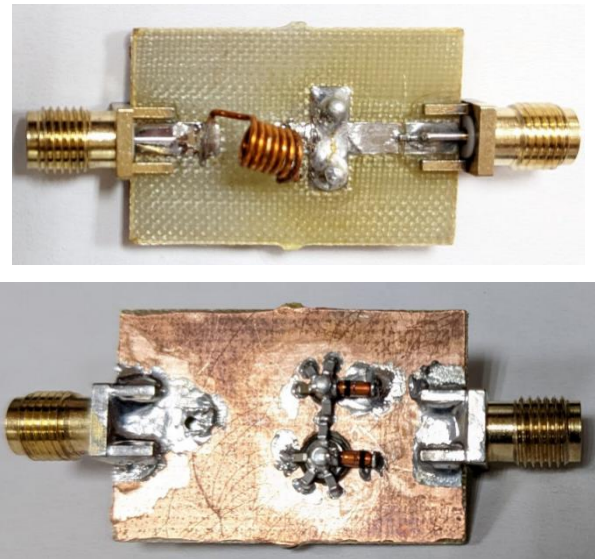


Рис. 5. Топологическая реализация двухтактного формирователя импульсов с увеличенной выходной мощностью

Экспериментальные результаты

На рис. 4 кривая 2 представляет результат измерения выходного сигнала двухтактного формирователя импульсов с проходной индуктивностью на входе. Амплитуда выходного сигнала составляет 13,1 В, что соответствует выходной мощности 3,4 Вт. Амплитуда сигнала без индуктивности на входе составляет 8,7 В (мощность 1,5 Вт). Таким образом, экспериментально выходную мощность удалось увеличить в 2,3 раза.

Длительность фронта импульса увеличилась с 0,29 до 0,39 нс. Представляется, что это связано с увеличением тока накачки диодов. В результате все этапы процесса экстракции неосновных носителей заряда в эмиттерную область растягиваются по времени. Дополнительно на рис. 2 видно, что фронт сигнала сокращен за счет индуктивности диодов и монтажа. На рис. 4 этот эффект практически незаметен.

Несмотря на увеличение длительности импульсов в новом варианте схемы, происходит увеличение крутизны фронта импульса. Это важно, поскольку сверхширокополосные антенны и малоразмерные зондируемые объекты обладают дифференцирующими свойствами по отношению к действующему на них сигналу. Зондирующий эффект сигнала в таких радиоизмерениях обусловлен скоростью нарастания сигнала, а не его амплитудой. Скорость нарастания сигнала увеличивается с 34 до 46 В/нс (в 1,4 раза). Поскольку в нелинейных измерениях амплитуда нелинейного отклика от объекта как минимум квадратично зависит от действующего параметра тестового сигнала, можно ожидать увеличения нелинейного отклика примерно вдвое.

Можно видеть также, что неквазистатическая модель ДНЗ уровня III [7] достаточно хорошо показывает себя в части предсказания амплитуды и крутизны фронта тестового сигнала (см. рис. 4). По результатам моделирования амплитуда сигнала составляет 13,4 В, экспериментально – 13,1 В.

Заключение

Итак, показано, что известный прием использования индуктивных накопителей энергии совместно с ключами на размыкание (ДНЗ) позволяет существенно (в 2,3 раза) увеличить мощность выходного сигнала двухтактного обострителя импульсов. В данном случае, однако, это обстоятельство нуждалось в специальной проверке, поскольку увеличенная амплитуда выходного сигнала потенциально могла приводить к паразитному открытию неактивного в данной фазе диода.

Кроме того, индуктивность в подобных схемах обычно используется в составе резонансных контуров. В данном случае это представляется нецелесообразным, так как ведет к возникновению значительных осцилляций сигнала на спаде импульса. Это нежелательно, поскольку обостритель используется для радиоизмерительных задач. В схемах с формированием импульсов одной полярности такие осцилляции могут быть подавлены диодными ключами на выходе обострителя. В данном случае это невозможно, поскольку выходная ступень обострителя должна одинаково работать для обоих направлений протекания тока.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FWRM-2021-0015).

Литература

1. Non-Linear System and Subsystem Modelling in The Time Domain / M.I. Sobhy, E.A. Hosny, M.W.R. Ng, E.-S.A. Bakkar // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1996. – Vol. 44, No. 12. – P. 2571–2579.
2. Pat. 7 230 970 US, IPC H 04 B 1/69, H 04 M 1/24. Apparatus and Method for Locating Nonlinear Impairments in a Communication Channel by Use of Nonlinear Time Domain Reflectometry / Bryant P.H. (US); assignee Chaos Telecom, Inc. – No. 10/612,175; filed 2.7.2003; date of patent 12.06.2007.
3. Baikalova A.E. Means and Methods for Decoupling of Receiving and Transmitting Paths of Nonlinear Baseband Pulse Radar / A.E. Baikalova, E.V. Semyonov // Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves: proc. of Int. IEEE Conf. – Divnomorskoe, Russia, 2023. – 4 p.
4. Авдеев В.Б. Сверхкороткоимпульсная сверхширокополосная нелинейная радиолокация / В.Б. Авдеев, А.В. Бердышев, С.Н. Панычев // Телекоммуникации. – 2006. – № 8. – С. 23–27.
5. Березин А.А. Двухтактный обостритель импульсов на диодах с накоплением заряда // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо–2022): матер. 32-й Междунар. конф. – Севастополь: СевГУ, 2022. – С. 247–248.
6. Pozdnyakov V.S. Fully Matched and Isolated Combiner on Suspended Striplines / V.S. Pozdnyakov, E.V. Semyonov // Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE 2023): proc. of XVI IEEE International Scientific-

Technical Conference. – Novosibirsk: NSTU, 2023. – [In print].

7. Семенов Э.В. Неквазистатическая модель диода с учетом токов экстракции и рекомбинации неравновесных носителей заряда / Э.В. Семенов, О.Ю. Малаховский, В.Г. Божков // Доклады ТУСУР. – 2019. – Т. 22, № 4. – С. 26–32.

8. Иванов П.А. Высоковольтные дрейфовые диоды с резким восстановлением на основе 4H-SiC: теоретическая оценка предельных параметров / П.А. Иванов, И.В. Грехов // Журнал технической физики. – 2015. – Т. 85, вып. 6. – С. 111–117.

9. Мегаваттный генератор наносекундных импульсов на основе карбидокремниевых дрейфовых диодов с резким восстановлением / А.В. Афанасьев, Ю.А. Демин, Б.В. Иванов, В.А. Ильин, В.В. Лучинин, К.А. Сергушичев, А.А. Смирнов // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. – 2015. – Вып. 3. – С. 21–24.

10. Ultra-short Pulse Generator with Back Edge Shaper / A.M. Bobreshov, A.S. Zhabin, V.A. Stepkin, G.K. Uskov // Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves: proc. of Int. IEEE Conf. – Divnomorskoe, Russia, 2019. – P. 204–207.

11. Yang A.T. An Efficient Non-Quasi-Static Diode Model for Circuit Simulation / A.T. Yang, Yu Liu, J.T. Yao // IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems. – 1994. – Vol. 13, No. 2. – P. 231–239.

12. Tseng K.J. Modelling of Diode Forward Recovery Characteristics Using a Modified Charge-Control Equation // IEEE Transactions on Power Electronics. – 1998. – Vol. 84, No. 5. – P. 437–444.

13. Lauritzen P.O. A Simple Diode Model with Reverse Recovery / P.O. Lauritzen, C.L. Ma // IEEE Transactions on Power Electronics. – 1991. – Vol. 6, No. 2. – P. 188–191.

14. Полупроводниковые приборы. Диоды высокочастотные, диоды импульсные, оптоэлектронные приборы: справочник / А.Б. Гитцевич, А.А. Зайцев, В.В. Мокряков, В.М. Петухов, А.К. Хрулев; под ред. А.В. Голомедова. – М.: Радио и связь, 1988. – 592 с.

15. Cain J. Parasitic Inductance of Multilayer Ceramic Capacitors: Technical Paper. – A Kyocera Group Company, 2020. – 5 p. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.avx.com/docs/techinfo/CeramicCapacitors/parasitc.pdf>, свободный (дата обращения: 25.09.2023).

Семенов Эдуард Валерьевич

Д-р техн. наук, с.н.с. Института сильноточной электроники (ИСЭ) СО РАН, проф. Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)

Академический пр-т, д. 2/3, г. Томск, Россия, 634055

ORCID: 0000-0001-5470-1185

Тел.: +7 (382-2) 49-15-44

Эл. почта: edwardsemyonov@narod.ru

Поздняков Владислав Сергеевич

Мл.н.с. ИСЭ СО РАН, аспирант ТУСУРа

Академический пр-т, д. 2/3, г. Томск, Россия, 634055

ORCID: 0000-0003-1775-4987

Тел.: +7 (382-2) 49-15-44

Эл. почта: 25pozdneyakov.v.s@gmail.com

Полторыхин Кирилл Михайлович

Мл.н.с. ИСЭ СО РАН, ассистент ТУСУРа
 Академический пр-т, д. 2/3, г. Томск, Россия, 634055
 ORCID: 0000-0002-2149-1035
 Тел.: +7 (382-2) 49-15-44
 Эл. почта: kpoltorykhin@inbox.ru

Березин Андрей Александрович

Мл.н.с. ИСЭ СО РАН, лаборант ТУСУРа
 Академический пр-т, д. 2/3, г. Томск, Россия, 634055
 Тел.: +7 (382-2) 49-15-44
 Эл. почта: berezin.a.182-m@e.tusur.ru

Semyonov E.V., Pozdnyakov V.S.,
 Poltorykhin K.M., Berezin A.A.

Increasing the Output Power of Two-Stroke Pulse Sharpeners Based on Step Recovery Diodes

The proposed two-stroke pulse sharpeners have a relatively low output power (1.5 W). This limits the use of such sharpeners for their intended purpose: for observing small nonlinear ultrawideband responses from objects in diagnostic, measuring and radar systems. In the article an approach to increase the output power of a sharpener is considered. At this approach the output pulse is created not by discharging the capacitance to the load, but by switching the current flowing through an inductive energy storage to the load. When the voltages in the circuit are limited (by bias sources), energy storage in the current form makes it possible to increase the output power of the sharpener to 3.4 W, and the slew rate of the output voltage from 34 to 46 V/ns.

Keywords: picosecond pulses, sharpeners, step recovery diodes, nonlinear pulse measurements.

DOI: 10.21293/1818-0442-2023-26-3-7-13

References

1. Sobhy M.I., Hosny E.A., Ng M.W.R., Bakkar E.-S.A. Non-Linear System and Subsystem Modelling in The Time Domain. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1996, vol. 44, no. 12, pp. 2571–2579.
2. Pat. 7 230 970 US, IPC H 04 B 1/69, H 04 M 1/24. Apparatus and Method for Locating Nonlinear Impairments in a Communication Channel by Use of Nonlinear Time Domain Reflectometry / Bryant P.H. (US); assignee Chaos Telecom, Inc. No. 10/612,175; filed 2.7.2003; date of patent 12.06.2007.
3. Baikalova A.E., Semyonov E.V. Means and Methods for Decoupling of Receiving and Transmitting Paths of Nonlinear Baseband Pulse Radar. *Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves*. Proceedings of International IEEE Conference. Divnomorskoe, Russia, 2023, 4 p.
4. Avdeev V.B., Berdyshev A.V., Panychev S.N. *Sverhkorotkoimpul'snaja sverhshirokopolosnaja nelinejnaja radiolokacija* [Ultra-Short-Pulse Ultra-Wideband Nonlinear Radar]. *Telekommunikacii* [Telecommunications], 2006, no. 8, pp. 23–27 (in Russ.).
5. Berezin A.A. *Dvuhtaktnyj obostritel' impul'sov na diodah s nakopleniem zarjada* [Two-Stroke Step Recovery Diode Pulse Sharpener]. SVCh-tehnika i telekommunikacionnye tehnologii (CriMiCo 2022). Materialy 32 Mezhdunarod. konf. [Microwave & Telecommunication Technology. Proceedings of 32 International Conference]. Sevastopol, SevSU, 2022, pp. 247–248 (in Russ.).
6. Pozdnyakov V.S., Semyonov E.V. Fully Matched and Isolated Combiner on Suspended Striplines. *Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE 2023)*. Proceedings

of XVI IEEE International Scientific-Technical Conference. Novosibirsk, NSTU, 2023 [in print].

7. Semyonov E.V., Malakhovskij O.Yu., Bozhkov V.G. Non-Quasi-Static Diode Model Taking into Account Extraction and Recombination Currents of Non-Equilibrium Charge Carriers and Its Use for Characterization of Step Recovery Diodes. *Proceedings of TUSUR University*, 2019, vol. 22, no. 4, pp. 26–32 (in Russ.).

8. Ivanov P.A., Grehov I.V. *Vysokovol'tnye drejfovyje diody s rezkim vosstanovleniem na osnove 4H-SiC: teoreticheskaja ocenka predel'nyh parametrov* [High-Voltage Drift Diodes with Sharp Recovery Based on 4H-SiC: Theoretical Assessment of Limiting Parameters]. *Zhurnal tehnichekoj fiziki* [Journal of Technical Physics], 2015, vol. 85, iss. 6, pp. 111–117 (in Russ.).

9. Afanasiev A.V., Demin Ju.A., Ivanov B.V., Ilin V.A., Luchinin V.V., Serguibchev K.A., Smirnov A.A., Kardosysoev A.F. [Megawatt Generator of Nanosecond Impulses on the Basis of Carbide-Silicon Drift Diodes with Sharp Restoration]. *Journal of the Russian Universities. Radioelectronics*, 2015, iss. 3, pp. 21–24 (in Russ.).

10. Bobreshov A.M., Zhabin A.S., Stepkin V.A., Uskov G.K. Ultra-short Pulse Generator with Back Edge Shaper. *Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves*. Proceedings of International IEEE Conference Divnomorskoe, Russia, 2019, pp. 204–207.

11. Yang A.T., Liu Yu, Yao J.T. An Efficient Non-Quasi-Static Diode Model for Circuit Simulation. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 1994, vol. 13, no. 2, pp. 231–239.

12. Tseng K.J. Modelling of Diode Forward Recovery Characteristics Using a Modified Charge-Control Equation. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 1998, vol. 84, no. 5, pp. 437–444.

13. Lauritzen P.O., Ma C.L. A Simple Diode Model with Reverse Recovery. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 1991, vol. 6, no. 2, pp. 188–191.

14. Gitcevic A.B., Zajcev A.A., Mokrjakov V.V., Petuhov V.M., Hrulev A.K. *Poluprovodnikovye pribory. Diody vysokochastotnye, diody impul'snye, optoelektronnye pribory: spravochnik* [Semiconductor devices. High-frequency diodes, pulse diodes, optoelectronic devices: reference book]; ed. by A.V. Golomedov. Moscow, Radio and Communications Publ., 1988, 592 p. (in Russ.).

15. Cain J. Parasitic Inductance of Multilayer Ceramic Capacitors: Technical Paper. A Kyocera Group Company, 2020. 5 p. Available at: <https://www.avx.com/docs/techinfo/CeramicCapacitors/parasitc.pdf> (Accessed: September 25, 2023).

Edward V. Semyonov

Doctor of Science in Engineering, Senior Researcher,
 Institute of High Current Electronics, Siberian Branch of the
 Russian Academy of Sciences, Professor, Tomsk State
 University of Control Systems and Radioelectronics
 2/3, Akademicheskij pr., Tomsk, Russia, 634055
 ORCID: 0000-0001-5470-1185
 Phone: +7 (382-2) 49-15-44
 Email: edwardsemyonov@narod.ru

Vladislav S. Pozdnyakov

Junior Researcher, Institute of High Current Electronics,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Postgraduate student, Tomsk State University
of Control Systems and Radioelectronics
2/3, Akademichesky pr., Tomsk, Russia, 634055
ORCID: 0000-0003-1775-4987
Phone: +7 (382-2) 49-15-44
Email: 25pozdnyakov.v.s@gmail.com

Andrey A. Berezin

Junior Researcher, Institute of High Current Electronics,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Laboratory Assistant, Tomsk State University
of Control Systems and Radioelectronics
2/3, Akademichesky pr., Tomsk, Russia, 634055
ORCID: 0000-0002-8589-0289
Phone: +7 (382-2) 49-15-44
Email: berezin.a.182-m@e.tusur.ru

Kirill M. Poltorykhin

Junior Researcher, Institute of High Current Electronics,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Assistant, Tomsk State University of Control Systems
and Radioelectronics
2/3, Akademichesky pr., Tomsk, Russia, 634055
ORCID: 0000-0002-2149-1035
Phone: +7 (382-2) 49-15-44
Email: kpoltorykhin@inbox.ru

УДК 534.864+537.872.32

Н.П. Красненко, Д.С. Раков, А.С. Раков

Направленные свойства акустической антенны в виде двух пространственно разнесенных фазированных антенных решеток

Приведены результаты разработки и исследования характеристик направленности акустических антенных систем (линейных массивов), состоящих из двух плоских антенных решеток. Их особенностью является большое межэлементное расстояние. Показано, что в ближней зоне характеристика направленности линейного массива близка к множителю решетки для данного массива. В дальней зоне диаграмма направленности помимо главного лепестка имеет и другие дифракционные (дополнительные) лепестки, зависящие от межэлементного расстояния и направленных свойств элементов массива. Определено общее количество лепестков характеристики направленности массива. Выбор межэлементного расстояния в массиве для получения приемлемой характеристики его направленности необходимо делать с учетом направленных свойств его элементов. Приведены технические характеристики разработанных линейных массивов.

Ключевые слова: антенная решетка, линейный массив, акустика, характеристика направленности, боковое излучение, звуковое давление.

DOI: 10.21293/1818-0442-2023-26-3-14-19

В практической акустике для озвучивания закрытого и открытого окружающего пространства широко применяются группы разнесенных в пространстве излучателей. Чаще всего это вертикальный или горизонтальный набор громкоговорителей, т.е. линейная антенная решетка, называемая в акустике линейным массивом (line array).

Представляет интерес анализ и синтез характеристики направленности таких акустических массивов, поскольку она у них бывает достаточно сложной. Отметим, что в рамках волновой теории и скалярного подхода методы расчета акустических антенн во многом аналогичны расчету радиоантенн диапазона СВЧ.

Разработка теории построения характеристики направленности для линейного массива громкоговорителей начинается с работы J. Wolff и L. Malter (1930) [1], где были описаны основы её расчета для дальней зоны. В дальнейшем теория была дополнена в работах Е. Скучика, Л. Беранека и др. [2–7]. Ближнее поле линейного массива точечных излучателей изучалось в работе Э. Виноградовой [8]. В статье [9] было показано, что коэффициент направленности для линейного массива из одинаковых, направленных и параллельно ориентированных излучателей определяется произведением числа элементов линейного массива на коэффициент направленности единичного излучателя.

В работах [10–13] авторами получены выражения для расчета характеристики направленности линейного массива громкоговорителей с коэффициентами возбуждения, заданными в соответствии со значениями набора функций Бесселя первого рода. Показаны расширение характеристики направленности по сравнению с линейным массивом излучателей с постоянным коэффициентом возбуждения, а также приближение ее к характеристике направленности одиночного громкоговорителя.

С практической точки зрения представляет интерес изучение свойств направленности и создание линейного массива из высоконаправленных излучате-

лей, каковыми являются отдельные рупорные излучатели или антенные решетки. Например, таким линейным массивом является акустическое устройство дальнего радиуса действия LRAD 2000X разработки компании GanesysInc (США) [14], состоящее из двух разнесенных в одной плоскости мощных акустических антенных решеток. Оно используется как для излучения мощных тональных сигналов при решении специальных задач, так и для передачи речевых сообщений.

Особенностью построения таких устройств является то, что в целом линейный массив представляет собой плоскую антенную решетку, состоящую из двух направленных элементов, при этом их межэлементное расстояние может значительно превышать длину излучаемой волны в каком-то диапазоне на высоких частотах. Такое построение устройства обусловлено большими массогабаритными характеристиками и не может быть выполнено в виде одной антенной решетки. Поэтому, с одной стороны, здесь увеличивается осевая направленность и мощность излучения, с другой стороны, появляется многолепестковая структура в диаграмме направленности и в целом ухудшается характеристика направленности массива, что необходимо учитывать.

Целью настоящей работы являются исследования характеристик направленности двухэлементных линейных массивов с большим межэлементным расстоянием. Проводятся теоретический анализ и экспериментальная проверка на основе двух разработанных массивов, каждый из которых состоит из двух акустических антенных решеток.

Теория

Возьмем линейный массив, в качестве элементов которого используются акустические антенные решетки. Кратко рассмотрим процесс построения характеристики направленности плоской многоэлементной антенной решетки.

Для приемника, расположенного в дальней зоне антенной решетки (рис. 1), разность хода лучей от

центра излучения решетки и конкретного излучателя до точки наблюдения с угловыми координатами θ и ϕ будет равна (1):

$$\Delta r = i \times d_x \sin(\theta) \cos(\phi) + j \times d_y \sin(\theta) \sin(\phi), \quad (1)$$

где d_x, d_y – шаг решетки по оси ox и oy соответственно, i, j – порядковый номер излучателя в плоскости эквидистантной решетки.

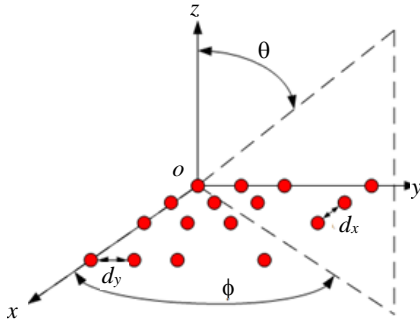


Рис. 1. К вопросу построения характеристики направленности антенной решетки

В дальней зоне акустическое поле антенной решетки представляет собой сумму полей каждого отдельного элемента, и его можно представить в виде произведения диаграммы направленности единичного элемента на множитель направленности антенной решетки

$$A(R) = F_{el}(\theta, \phi) f_{\Sigma}(\theta, \phi) \frac{e^{jkr}}{R}, \quad (2)$$

где $F_{el}(\theta, \phi)$ – диаграмма направленности единичного элемента, $f_{\Sigma}(\theta, \phi)$ – множитель решетки, R – расстояние до точки наблюдения, k – волновое число.

В общем случае, делая предположение, что амплитуда возбуждения единичного элемента может различаться, множитель решетки можно записать следующим образом:

$$f_{\Sigma}(\theta, \phi) = \sum_{i=0}^{h-1} \sum_{j=0}^{l-1} |P_{i,j}| e^{jk\Delta r_{i,j}}, \quad (3)$$

где i, j – порядковый номер излучателя в плоскости решетки; $P_{i,j}$ – амплитуда единичного элемента (звуковое давление), которая в расчетах ниже принимается одинаковой; $\Delta r_{i,j}$ – разность хода лучей от излучателя с порядковым номером i, j до точки наблюдения; h, l – число элементов в антенной решетке по оси x, y соответственно.

Рассматриваемые в статье линейные массивы представляют собой антенную решетку, состоящую из двух излучающих элементов, разнесенных в одной плоскости. Множитель решетки для такого линейного массива определяется выражением

$$F(\theta) = \frac{\sin(kd \sin(\theta))}{2 \sin(\frac{1}{2} kd \sin(\theta))}, \quad (4)$$

где d – расстояние между двумя элементами (их центрами).

При построении линейного массива следует учитывать, что от его геометрических размеров, а также от соотношения расстояния между его элементами d и длиной волны λ зависит характеристика направленности данного массива. Особенность двух-

элементных массивов заключается в том, что их диаграмма направленности имеет многолепестковый характер. Множитель решетки (4) является периодической функцией угла θ , и при определенных значениях отношений d/λ диаграмма направленности помимо главного лепестка будет иметь и другие дифракционные (дополнительные) лепестки. Если элементы массива ненаправленные, то они имеют такой же уровень, как и главный лепесток. С использованием направленных элементов дополнительные лепестки можно в какой-то степени подавить.

Для исключения возникновения дополнительных главных лепестков в характеристике направленности линейного массива необходимо выбирать межэлементное расстояние $d < \lambda$, что далеко не всегда возможно на практике, особенно при широкополосном излучении (приеме).

Для рассматриваемых в этой статье линейных массивов характерно то, что расстояние между элементами значительно больше длины волны.

Направление главных максимумов характеристики направленности линейного массива определяется выражением

$$\sin(\theta_{\text{глав}}) = \frac{2m\pi}{kd}, \quad (5)$$

где $m = \pm 1, \pm 2, \dots$. При этом $m \neq 2n$, где n – целое число длин волн, укладывающихся в расстояние d . Следует учитывать, что m может принимать конечное число значений, которое определяется условием $\sin(\theta) \leq 1$. Исходя из того, что $d > \lambda$, количество главных максимумов будет равно $n + 1$ на интервале от 0 до $\pi/2$.

На рис. 2 показаны рассчитанные характеристики направленности линейного массива, состоящего из двух ненаправленных элементов для различных отношений d/λ .

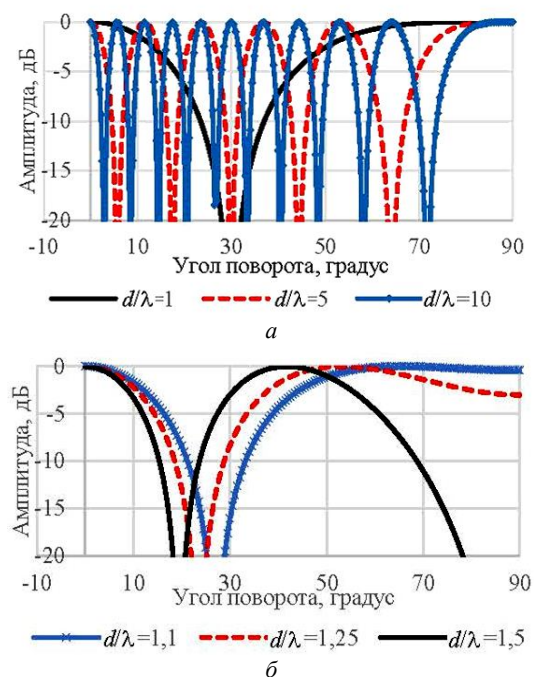


Рис. 2. Характеристика направленности линейного массива из двух ненаправленных элементов для различных отношений d/λ

Для уменьшения бокового излучения в секторе углов, близких к 90° , необходимо выбирать межэлементное расстояние, кратное половине длины волны $m\lambda/2$, при этом $m = \pm 1, \pm 2 \dots$ и $m \neq 2n$.

В случае если в линейном массиве каждый из элементов обладает направленностью, то итоговая характеристика направленности будет определяться выражением (2).

Линейные массивы и методика измерений

Были изготовлены два линейных массива. Первый АИ7х2 (рис. 3) состоял из двух 7-элементных антенных решеток с использованием пьезокерамических электроакустических преобразователей ПЭП-3-01 [15]. Расстояние между ними можно было изменять. Габаритные размеры одного элемента линейного массива $250 \times 210 \times 15$ мм.



Рис. 3. Внешний вид экспериментального макета линейного массива АИ7х2. В центре показан шумомер 1-го класса точности, внизу – усилитель мощности

Второй линейный массив АИ91Мх2 (рис. 4) состоял из двух 91-элементных антенных решеток с использованием пьезокерамических электроакустических преобразователей KSN-1165А [16], размещенных по гексагональной схеме.



Рис. 4. Внешний вид линейного массива АИ91Мх2, установленного на экспериментальной площадке

Данные преобразователи эффективно работают на частотах выше 2000 Гц. Габаритные размеры одного элемента линейного массива $780 \times 900 \times 190$ мм. Расстояние между элементами линейного массива было фиксированным и составляло 1 м между их центрами. В целом параметры разработанных массивов приведены в таблице.

Экспериментальная площадка, над которой снимались характеристики направленности, представляла собой ровную поверхность земли с травяной растительностью высотой до 30–40 см. Измерение характеристики направленности проводилось следующим образом: линейный массив располагался на поворотном устройстве на высоте 3 м от центра излучателя до поверхности земли. Впереди на заданном расстоянии устанавливалась мачта с закрепленным на высоте 3 м измерительным микрофоном. Расстояние до микрофона выбиралось таким образом, чтобы оно соответствовало дальней зоне для исследуемого линейного массива на частоте излучения.

Параметры разработанных линейных массивов

Параметр	АИ7х2	АИ91Мх2
Габаритные размеры линейного массива, мм	450×210×15 (мин.), 950×210×15 (макс.)	1780×900×190
Общее количество электроакустических преобразователей в линейном массиве	14	182
Тип используемого электроакустического преобразователя	ПЭП-3-01	KSN-1165А
Габаритные размеры одного элемента линейного массива, мм	250×210×15	780×900×190
Максимум излучения в диапазоне частот, Гц	3000–3300	2000–3300
Расстояние между центрами элементов линейного массива	Изменяемое, от 20 до 70 см	Фиксированное, 1 м

Управление элементами массива осуществлялось с помощью ноутбука с установленным программным обеспечением для генерирования различного вида звуковых сигналов. Уровень звукового давления фиксировался с помощью шумомера 1-го класса точности. Эксперименты проводились в ясную погоду, в условиях штиля и минимума фонового окружающего шума. Эксперимент проводился последовательно: при излучении только левого элемента линейного массива, при излучении только правого элемента линейного массива, при излучении двух элементов одновременно. Шаг измерения характеристики направленности по углу составлял 2° .

Результаты исследований

На рис. 5 и 6 приведены результаты измерения характеристики направленности линейного массива

АИ7х2 для различных межэлементных расстояний. Измерения проводились на частоте 3150 Гц, являющейся частотой резонанса пьезокерамических электроакустических преобразователей, из которых изготовлены элементы линейного массива. Максимальное количество боковых лепестков характеристики направленности определяется величиной межэлементного расстояния. С увеличением отношения d/λ количество лепестков растет и стремится к $n+1$, где n – целое число длин волн λ , укладывающихся в расстояние d . При этом если отношение d/λ не является целым числом, то итоговая характеристика направленности линейного массива имеет провал в направлении 90° . Величина этого провала максимальна, когда d/λ кратно половине длины волны.

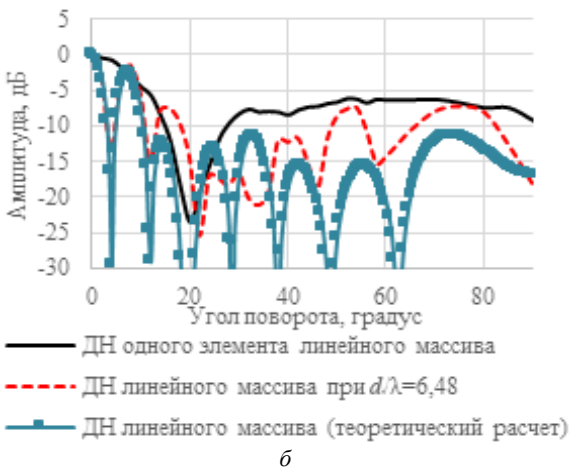
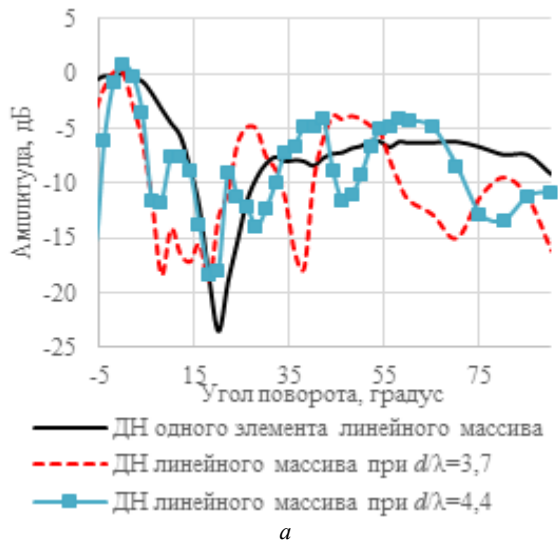


Рис. 5. Характеристики направленности линейного массива на частоте 3150 Гц ($\lambda = 10,8$ см) при различных отношениях d/λ : при $d/\lambda = 3,7$; $d/\lambda = 4,4$ (а); $d/\lambda = 6,48$ (б)

При увеличении расстояния между элементами линейного массива и, соответственно, увеличении его размера увеличивается и граница дальней зоны. Так, для частоты 3150 Гц граница дальней зоны составляет 1,05 м для одного 7-элементного излучателя. Для линейного массива АИ7х2, когда элементы расположены максимально близко друг к другу, для частоты 3150 Гц граница дальней зоны составляет 1,85 м.

На рис. 6 показан процесс формирования характеристики направленности линейного массива АИ7х2 при переходе из ближней в дальнюю зону для частоты 3150 Гц и расстояния между элементами 70 см.

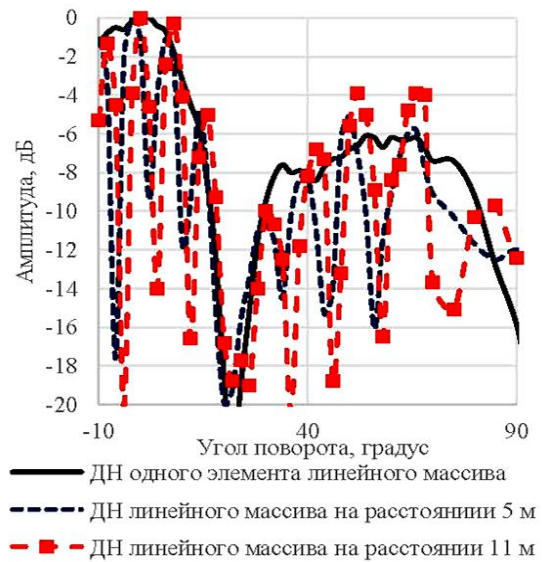


Рис. 6. Характеристика направленности линейного массива для межэлементного расстояния 70 см ($d/\lambda = 6,48$) в зависимости от расстояния по оси излучения до точки наблюдения

На рис. 7 приведены результаты теоретических расчетов и измерений характеристики направленности линейного массива АИ91Мх2 при $d/\lambda = 7,2$ на частоте 2500 Гц ($\lambda = 13,6$ см), которая является резонансной для пьезокерамических электроакустических преобразователей, из которых изготовлен линейный массив.

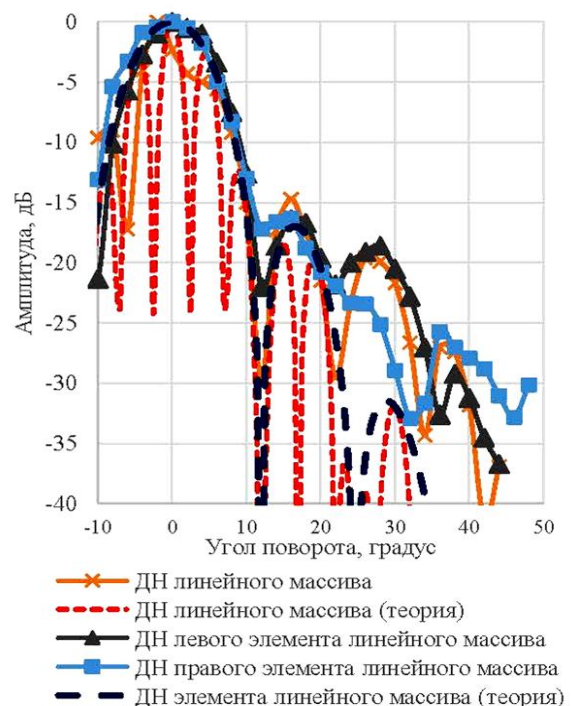


Рис. 7. Характеристики направленности линейного массива на частоте 2500 Гц при $d/\lambda = 7,2$

Из представленных результатов видно, что характеристика направленности массива содержит очень узкий центральный лепесток и узкие боковые лепестки, при этом ширина этих лепестков не превышает 5° по уровню -3 дБ от его максимального значения. Экспериментальная диаграмма направленности массива в районе максимума немного отличается от теоретической, она несимметрична и сдвинута влево от оси на $2,5^\circ$. Это может быть обусловлено погрешностями измерений по углу с шагом в 2° и наличием небольшого фазового сдвига между элементами при запуске излучения. В пределах ширины главного лепестка диаграммы направленности единичного элемента по уровню -3 дБ укладываются три лепестка линейного массива. Контур характеристики единичного элемента массива представляет собой огибающую максимумов лепестков характеристики направленности всего линейного массива. Узость главного лепестка диаграммы направленности обусловлена размером линейного массива, а низкий уровень боковых лепестков – применением направленных элементов в виде антенных решеток.

Из графиков видно, что в пределах главного лепестка элемента массива структура характеристики направленности в ближней зоне сохраняет направление максимумов и минимумов, характерных для характеристики направленности, измеренной в дальней зоне. В него укладываются пять лепестков массива, причем три – в пределах уровня -3 дБ.

Заключение

Проведенные теоретические расчеты и экспериментальные исследования разработанных двухэлементных массивов акустических излучателей разъясняют процесс формирования характеристики направленности линейного массива.

1. В ближней зоне массива, структура характеристики направленности сохраняет направления максимумов и минимумов излучения, характерных для характеристики направленности, измеренной в дальней зоне.

2. Общее число максимумов в характеристике направленности массива на интервале от 0 до $\pi/2$ составляет $n + 1$, где n – число длин волн, укладываемых на межэлементном интервале d массива. При этом если отношение d/λ не является целым числом, то итоговая характеристика направленности линейного массива имеет провал в направлении 90° . Величина этого провала максимальна, когда d/λ кратно половине длины волны.

3. При поиске оптимального отношения d/λ (когда $d > \lambda$) необходимо учитывать характеристику направленности его элементов. При использовании широкополосного излучения, это особенно актуально для высоких частот.

Результаты данной работы можно использовать при построении систем звукового воздействия и вещания, где одними из главных параметров, наряду с частотным диапазоном, являются создаваемое зву-

ковое давление и характеристика направленности (зона озвучивания), а также при построении линейных антенных решеток электромагнитных волн диапазона СВЧ.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИМКЭС СО РАН по проекту № 121031300155-8 и за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-00750, <https://rscf.ru/project/22-29-00750/>, на ИМКЭС СО РАН.

Литература

1. Wolff I. Directional radiation of sound / I. Wolff, L. Malter // The Journal of the Acoustical Society of America. – 1930. – Vol. 2. – P. 201–241. <https://doi.org/10.1121/1.1915251>.
2. Skudrzyk E. The Foundations of Acoustics. – New York: Springer-Verlag, 1971. – 790 p.
3. Beranek L.L. Acoustics. – American Institute of Physics for the Acoustical Society of America, 1986. – 491 p.
4. Beranek L.L. Acoustics: Sound Fields and Transducers / L.L. Beranek, T.J. Mellow. – Kidlington, Oxford; Waltham, Ma.: Academic Press, 2012. – 720 p.
5. Wood A.B. A text book of sound. – London: G. Bell and Sons, 1941. – 361 p.
6. Rossi M. Acoustics and Electroacoustics. – Norwood, MA: Artech House, 1988. – 258 p.
7. Ureda M.S. Analysis of Loudspeaker Line Arrays // J. Audio Eng. Soc. – 2004. – Vol. 52, No. 5. – P. 467–495.
8. Виноградова Э.Л. Ближнее поле линейной излучающей группы // Акустический журнал. – 1966. – Т. 12, № 1. – С. 7–11.
9. Виноградова Э.Л. Коэффициент направленности линейной группы направленных излучателей / Э.Л. Виноградова, В.В. Фурдуй // Акустический журнал. – 1966. – Т. 12, № 2. – С. 181–184.
10. Лунева С.А. Направленность излучения звука линейными массивами Бесселя: ч. 1 / С.А. Лунева, А.С. Ревенко, И.Н. Санжара // Электроника и связь. – 2015. – Т. 20, № 2. – С. 79–89.
11. Лунева С.А. Направленность излучения звука линейными массивами Бесселя: ч. 2 / С.А. Лунева, А.С. Ревенко, И.Н. Санжара // Электроника и связь. – 2015. – Т. 20, № 4. – С. 53–60.
12. Bessel panels – high-power speaker systems with radial sound distribution // Literature given out by Philips at the European AES. Technical publication 091. – 1983. – 4 p. – URL: https://www.academia.edu/25398111/Bessel_Panels_Philips_Technical_Publication_091 (дата обращения: 20.06.2023).
13. Aarts R.M. On analytic design of loudspeaker arrays with uniform radiation characteristics / R.M. Aarts, A.J. Janssen // The Journal of the Acoustical Society of America. – 2000. – Vol. 107 (1). – P. 287–292. DOI:10.1121/1.428305.
14. LRAD Defense Brochure. – URL https://genasys.com/wp-content/uploads/2019/10/Brochure_Defense.pdf (дата обращения: 20.06.2023).
15. Звуковой излучатель ПЭП-3-01, 120 дБ, 125 дБ, 3000–3300 Гц. – URL: http://aerofon34.ru/?page_id=306 (дата обращения: 20.06.2023).
16. Красненко Н.П. Мощные акустические антенные решетки для атмосферных приложений / Н.П. Красненко, А.С. Раков, Д.С. Раков // Научное приборостроение. – 2018. – Т. 28, № 4. – С. 90–97. DOI: 10.18358/np-28-4-i9097.

Красненко Николай Петрович

Д-р физ.-мат. наук, проф., гл. н.с. лаб. акустических исследований Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (ИМКЭС СО РАН) Академический пр-т, 10/3, г. Томск, Россия, 634055; Проф. каф. радиотехнических систем (РТС) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050.
ORCID: 0000-0002-7499-6635
Тел.: +7 (382-2) 49-24-18
Эл. почта: krasnenko@imces.ru

Раков Денис Сергеевич

Канд. техн. наук, н.с. лаб. акустических исследований ИМКЭС СО РАН Академический пр-т, 10/3, г. Томск, Россия, 634055
ORCID: 0000-0001-8404-7882
Тел.: +7 (382-2) 49-24-18
Эл. почта: rds@tpu.ru

Раков Александр Сергеевич

Мл. н.с., лаб. акустических исследований ИМКЭС СО РАН Академический пр-т, 10/3, г. Томск, Россия, 634055
Тел.: +7 (382-2) 49-24-18
Эл. почта: alexanderrakov1985@gmail.com

Krasnenko N.P., Rakov D.S., Rakov A.S.

Directional patterns of the acoustic antenna based on two spatially separated phased antenna arrays

The article presents the results of research and development of the characteristics of the radiation patterns of acoustic antenna systems (linear arrays), consisting of two flat antenna arrays. Their special feature is a large distance between the elements. It is shown that in the near field zone, the directional pattern of the linear system is close to the array factor for the given system. In the far field zone, the directional pattern, in addition to the main lobe, has other (additional) diffraction lobes that depend on the distance and directional characteristics of the system elements. The total number of lobes in the directional pattern of the system has been found. To obtain an acceptable directivity pattern, it is necessary to choose the distance between the elements taking into account the directivity patterns of its elements. The technical characteristics of the developed linear systems are given.

Keywords: antenna array, linear system, acoustics, directional characteristic, lateral radiation, sound pressure.

DOI: 10.21293/1818-0442-2023-26-3-14-19

References

1. Wolff I., Malter L. Directional radiation of sound. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1930, vol. 2, pp. 201–241. <https://doi.org/10.1121/1.1915251>.
2. Skudrzyk, E. *The Foundations of Acoustics*. New York, Springer-Verlag, 1971, 790 p.
3. Beranek L.L. *Acoustics*. American Institute of Physics for the Acoustical Society of America, 1986, 491 p.
4. Beranek L.L., Mellow T.J. *Acoustics: Sound Fields and Transducers*. Kidlington, Oxford; Waltham, MA, Academic Press, 2012, 720 p.
5. Wood A.B. *A text book of sound*. London: G. Bell and Sons. 1941, 361 p.
6. Rossi M. *Acoustics and Electroacoustics*. Norwood, MA, Artech House, 1988, 258 p.
7. Ureda M.S. Analysis of Loudspeaker Line Arrays. *J. Audio Eng. Soc.*, 2004, vol. 52, no. 5, pp. 467–495.

8. Vinogradova E.L. The near field of a linear group of radiators. *Akusticheskij Zhurnal*, 1966, vol. 12, no. 1, pp. 7–11 (in Russ.).

9. Vinogradova E.L., Furduev V.V. Directivity coefficient of a linear group of directional transducers. *Akusticheskij Zhurnal*, 1966, vol. 12, no. 2, pp. 181–184 (in Russ.).

10. Luniova S.A., Revenko A.S., Sanzhara I.M. The Directivity of sound radiation by linear Bessel array. Part 1. *Electronics and communications*, 2015, vol. 20, no. 2, pp. 79–89 (in Russ.).

11. Luniova S.A., Sanzhara I.M. Directivity of sound radiation by linear Bessel array. Part 2. *Electronics and communications*. 2015, vol. 20, no. 4, pp. 53–60 (in Russ.).

12. *Bessel panels – high-power speaker systems with radial sound distribution*. Literature given out by Philips at the European AES, Technical publication 091, 1983. 4 p. Available at https://www.academia.edu/25398111/Bessel_Panels_Philips_Technical_Publication_091, free (Accessed: June 20, 2023).

13. Aarts R. M., Janssen A. J. On analytic design of loudspeaker arrays with uniform radiation characteristics. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2000, vol. 107, no. 1, pp.287–292. DOI:10.1121/1.428305.

14. *LRAD Defense Brochure*. Available at https://genasys.com/wp-content/uploads/2019/10/Brochure_Defense.pdf, free (Accessed: June 20, 2023).

15. *Sound transducer PEP-3-01, 120 dB, 125 dB, 3000–3300 Hz*. Available at: http://aerofon34.ru/?page_id=306 (Accessed: June 20, 2023).

16. Krasnenko N.P., Rakov A.S., Rakov D.S. Powerful acoustic antenna arrays for atmospheric applications. *Scientific instrument making*, 2018, vol. 28, no. 4, pp. 90–97 (in Russ.). DOI: 10.18358/np-28-4-i9097.

Nikolay P. Krasnenko

Doctor of Science in Physics and Mathematics, Professor, Chief Researcher, Laboratory of Acoustic Researches, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences 10/3, Akademicheskii pr., Tomsk, 634055, Russia; Professor of Department of Radio Engineering Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050.
ORCID: 0000-0002-7499-6635
Phone.: +7 (382-2) 49-24-18
Email: krasnenko@imces.ru

Denis S. Rakov

Candidate of Science in Engineering, Researcher, Laboratory of Acoustic Researches, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences 10, Akademicheskii pr., Bldg. 3, Tomsk, Russia, 634055.
ORCID: 0000-0001-8404-7882
Phone.: +7 (382-2) 49-24-18
Email: rds@tpu.ru

Alexander S. Rakov

Junior Researcher, Laboratory of Acoustic Researches, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences 10, Akademicheskii pr., Bldg. 3, Tomsk, Russia, 634055.
Phone.: +7 (382-2) 49-24-18
Email: alexanderrakov1985@gmail.com

УДК 621.372.2

В.Г. Нечаев, А.С. Загородний, А.М. Заболоцкий

Пассивная компенсация температурной нестабильности сверхвысокочастотных диодных детекторов мощности

Отображены результаты исследования температурного влияния на характеристики низкобарьерных диодов ZB-28 и диодных детекторов мощности СВЧ-сигналов на их основе. Предложен способ компенсации температурной нестабильности детектора мощности, реализованный за счет включения в схему диодного детектора дополнительного опорного диода. Представлены основные результаты экспериментальных исследований разработанного детектора с пассивной температурной компенсацией.

Ключевые слова: диодный детектор мощности, низкобарьерный диод, температурные испытания, отклонение выходного напряжения, температурная стабильность.

DOI: 10.21293/1818-0442-2023-26-3-20-26

Развитие техники крайне высоких и сверхвысоких частот (КВЧ и СВЧ) напрямую связано со значительным ростом требований, предъявляемых к контрольно-измерительной аппаратуре микроволнового диапазона, в частности, к устройствам, предназначенным для преобразования сигналов.

В работе рассматривается способ пассивной компенсации температурных погрешностей на характеристики детектора мощности, выполненного на основе низкобарьерного диода.

Температурное влияние на параметры СВЧ-диодов

Выпрямительные диоды широко используются в качестве детекторов для измерения мощности СВЧ-сигналов в заданном диапазоне частот или на определенной рабочей частоте. Данный тип детекторов позволяет выделять огибающую высокочастотных сигналов за счет преобразования сигналов переменного тока в сигналы постоянного тока, возникающего из-за нелинейной вольт-амперной характеристики (ВАХ) диода и фильтрующих свойств самого детектора [1].

Основным недостатком данного типа диодов является недостаточная чувствительность для различных вариантов использования, так как при измерении мощности малых уровней значительное влияние оказывают колебания температуры. Данное явление обусловлено свойствами полупроводников: с увеличением температуры удельное сопротивление полупроводника сильно уменьшается и при достаточно высоких температурах становится крайне малым [2].

Для описания функционирования диодов используется аналитическая формула для ВАХ, учитывающая омическое сопротивление диода:

$$I(U) = S \cdot A \cdot T \cdot e^{-q\psi/kT} \cdot e^{\left(\frac{q(U - I_s R_j)}{n \cdot k \cdot T}\right)}, \quad (1)$$

где S – площадь перехода, м^2 ; A – постоянная Ричардсона, для GaAs $8,4 \cdot 10^4 \text{ A}/(\text{K}^2 \cdot \text{м}^2)$; k – постоянная Больцмана, $\text{Дж} \cdot \text{K}^{-1}$; T – температура, K ; q – заряд электрона, Кл ; ψ – ширина запрещенной зоны полупроводника, эВ ; I_s – ток насыщения, A ; R_j – сопро-

тивление перехода, Ом ; n – коэффициент идеальности.

На рис. 1 представлены характеристики германиевого и кремниевого диодов, иллюстрирующие зависимость ВАХ от температуры [3].

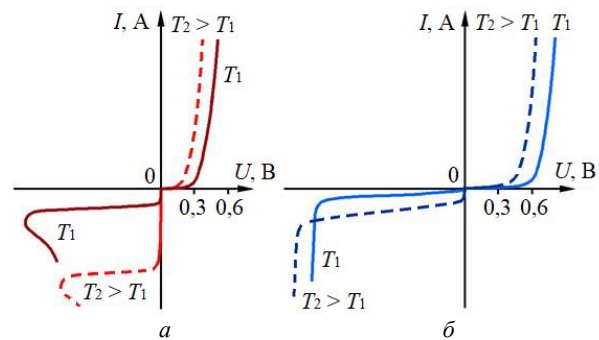


Рис. 1. Влияние температуры на ВАХ германиевого (а) и кремниевого (б) диодов

Из выражения (1) следует, что ток, протекающий через диод, пропорционален температуре.

При создании детекторов СВЧ-сигналов часто применяются диоды Шоттки на основе арсенида галлия (GaAs), выпрямительные свойства которых основаны на использовании выпрямляющего электрического перехода между металлом и полупроводником [3]. Основным недостатком использования диодов Шоттки является низкая чувствительность для сигналов малых уровней мощности. Это обусловлено большой высотой потенциального барьера, слабо зависящей от выбора металла для формирования перехода металл-полупроводник.

Одним из вариантов решения этой проблемы является применение других видов нелинейных элементов со свойствами, схожими с диодами Шоттки. Таким вариантом является переход к диодам на основе планарно-легированных структур (ПЛС) [4], которые в настоящее время широко используются зарубежными компаниями (Avago Technologies, Keysight Technologies, Aeroflex/Metelics).

К основным свойствам данной структуры следует отнести зависимость высоты потенциального барьера от толщин легирования эпитаксиальных

слоёв, а также положения дельта-слоя внутри слоя с собственной проводимостью, что позволяет создавать низкобарьерные диоды [5]. Особенностью использования низкобарьерных диодов по сравнению с другими выпрямляющими диодами является необходимость учета и описания обратной ветви ВАХ вследствие высокого обратного тока в рабочем диапазоне обратного напряжения.

Для исследования температурного влияния в настоящей работе было проведено моделирование низкобарьерного GaAs диода ZB-28 на основе планарно-легированных структур производства АО «НПФ «Микран», предназначенного для работы в составе гибридно-интегральных СВЧ-модулей с общей герметизацией. Данный диод характеризуется широкими динамическим и частотным диапазонами, высоким быстродействием и эффективной работой в режиме без смещения [6]. Параметры ZB-28 представлены в таблице.

Параметры ZB-28 при $T = 25\text{ }^\circ\text{C}$

Обозначение	Наименование	Ед. изм.	Значение
R_s	Последовательное сопротивление	Ом	30
C_p	Ёмкость корпуса	фФ	35
C_j	Ёмкость перехода	фФ	24
L_p	Индуктивность выводов	нГн	0.3
R_v	Выходное сопротивление	кОм	1.8
G	Чувствительность по напряжению ($f = 10\text{ ГГц}$, согласован на 50 Ом)	мВ/мВт	550
TSS	Тангенциальная чувствительность ($f = 10\text{ ГГц}$, согласован на 50 Ом)	дБм	-60

Для моделирования температурного влияния потребовалось разработать модель детекторного диода ZB-28, отражающую основные статистические и динамические характеристики. Имеется публикация [7], в которой описан процесс разработки модели детекторного диода ZB-28. Отличительной особенностью модели в настоящей работе является использование расширенного списка SPICE-параметров для описания влияния температуры.

Моделирование диода ZB-28 основано на применении SPICE-параметров, полученных путём экстракции из статистических характеристик диодов. SPICE-модель полупроводникового диода состоит из трех составляющих:

1. Эквивалентная схема диода.
2. Перечень параметров модели диода.
3. Совокупность основных уравнений, отражающих зависимости элементов эквивалентной схемы и ряда параметров модели от напряжений, токов, температуры и т.д.

В качестве исходных данных выступает выборка из десяти идентичных диодов ZB-28. Для данных диодов были экспериментально измерены вольт-амперные характеристики для прямой и обратной ветвей в широком диапазоне температур от -60 до $+85\text{ }^\circ\text{C}$. Далее в пределах выборки было произведе-

но усреднение ВАХ для каждой из температур. Результат представлен на рис. 2, 3.

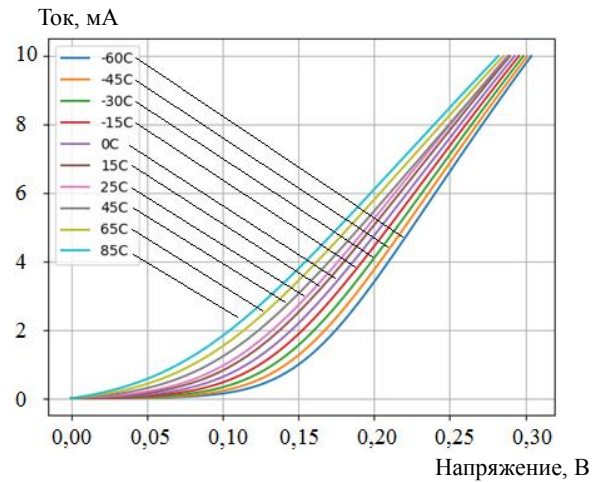


Рис. 2. Прямая ветвь ВАХ диода ZB-28

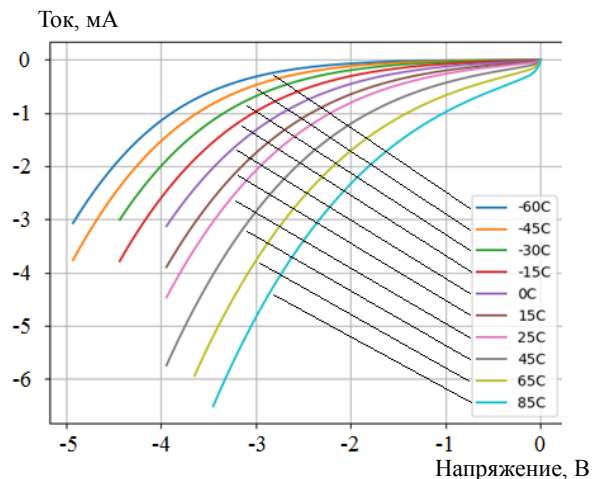


Рис. 3. Обратная ветвь ВАХ диода ZB-28

Модель ZB-28 представляет собой встречно-параллельное соединение двух диодов, как показано на рис. 4. Использование данной модели обусловлено спецификой низкобарьерных диодов, а именно необходимостью описывать обратную ветвь ВАХ вследствие высокого обратного тока в рабочем диапазоне обратного напряжения [8]. На рис. 4 VD_1 характеризует работу диода при прямом смещении, а VD_2 – при обратном.

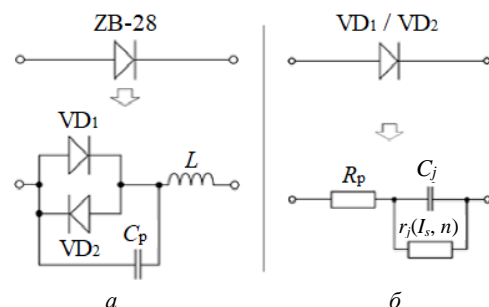


Рис. 4. Принципиальная электрическая схема [7]: а – эквивалентная схема диода; б – эквивалентная схема диода с учётом схемы замещения выпрямляющего диода

Модель диода на основе SPICE-параметров характеризуется совокупностью параметров, которые с некоторой точностью описывают физический процесс, протекающий внутри полупроводникового элемента. Параметр R_s характеризует последовательное сопротивление диода. В модели за зависимость R_s от температуры отвечают два коэффициента – линейный (T_{rs1}) и квадратичный (T_{rs2}). В реальности же эта зависимость может иметь более сложную форму. Всего насчитывается более ста различных SPICE-параметров, но в данном исследовании использовалось тринадцать.

Для создания модели диода ZB-28 была использована САПР Advanced Design System (рис. 5). Из справочной информации [6] взяты емкость перехода C_j и последовательное сопротивление R_s . На основе экспериментальных значений ВАХ был определен ток насыщения I_s . С помощью инструмента оптимизации были определены и адаптированы остальные данные для модели диода со встречно-параллельным соединением. Полученные в результате моделирования ВАХ диода приведены на рис. 6, 7.

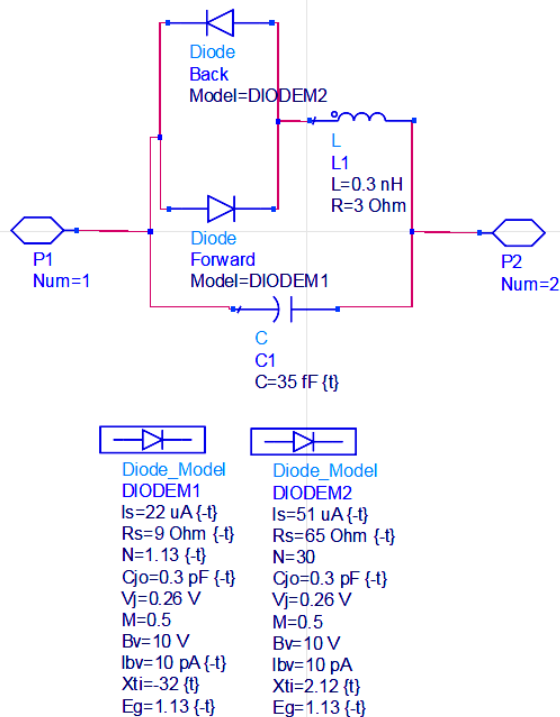


Рис. 5. Модель диода ZB-28, реализованная в САПР Advanced Design System

За счёт использования полученных SPICE-параметров, определена зависимость сопротивления перехода диода ZB-28 от температуры (рис. 8).

Проанализировав полученные данные из рис. 8, можно определить, что при низких значениях температуры происходит повышение сопротивления перехода, что, в свою очередь, приводит к существенному отклонению выходного напряжения детектора. Влияние этого сопротивления на выходное напряжение детектора, описываемое выражением

$$U_{out} = U_{rec} \cdot \frac{R_l}{R_l + R_j}, \quad (2)$$

где U_{rec} – выпрямленное напряжение; R_l – нагрузочное сопротивление детектора, приводит к существенному отклонению выходного напряжения детектора от выпрямленного напряжения.

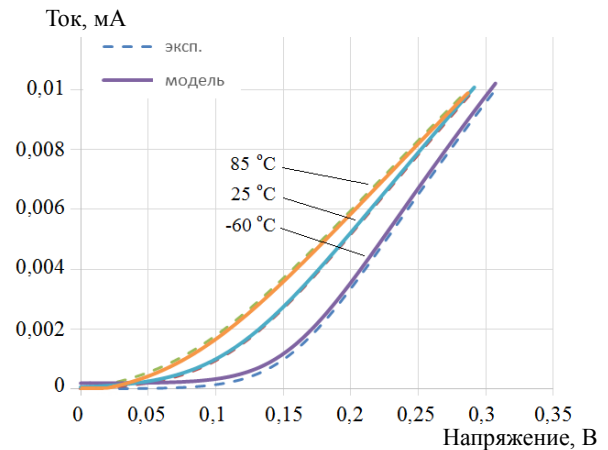


Рис. 6. Сравнение прямой ветви ВАХ модели ZB-28 и экспериментальной ВАХ диода

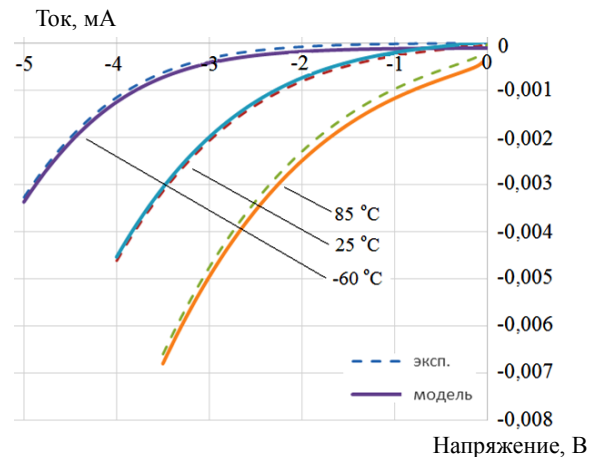


Рис. 7. Сравнение обратной ветви ВАХ модели ZB-28 и экспериментальной ВАХ диода

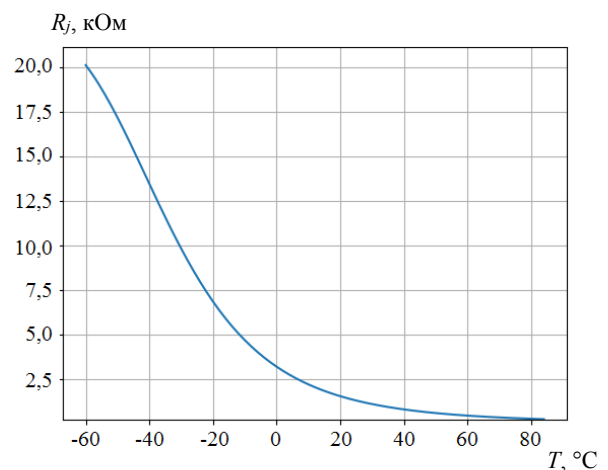


Рис. 8. Зависимость сопротивления перехода от температуры

Представленные выражения и рисунки свидетельствуют об отклонении зависимости падения

напряжения на диоде за счет изменения его температуры и сопротивления перехода.

Способ пассивной температурной компенсации

Схема амплитудного диодного детектора, представленная на рис. 9, содержит резистор $R_{согл}$ для согласования входного импеданса детектора, диод VD_1 и конденсатор C_p . При подключении внешней нагрузки конденсатор детектора совместно с импедансом нагрузки образуют фильтр низких частот (ФНЧ), необходимый для выделения низкочастотного выходного напряжения.

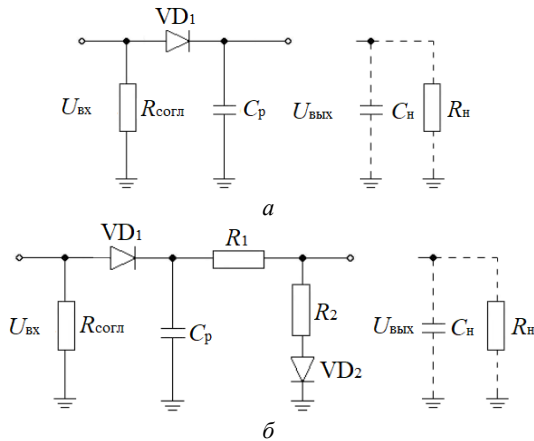


Рис. 9. Диодный детектор без схемы температурной компенсации (а) и с ней (б)

Отличительной особенностью схемы диодного детектора с температурной компенсацией является наличие опорного диода в схеме детектора. Идея данного метода заключается в компенсации изменения сопротивления диода путём включения в схему детектора идентичного опорного диода через переменный делитель [9]. Таким образом, при изменении температуры у обоих диодов аналогичным образом изменяются сопротивления переходов, за счёт чего компенсируется изменение выходного напряжения.

Недостатком данного метода температурной компенсации является ответвление части сигнала в цепь с опорным диодом. Так как в схеме на рис. 9, б для резистивного делителя используются одинаковые номиналы сопротивлений R_2, R_3 , то для этой схемы значение выходного напряжения детектора будет меньше приблизительно на 3 дБ по сравнению со схемой на рис. 9, а.

Значения сопротивлений и ёмкостей для схемы детектора были выбраны на основе уже существующих детекторов мощности серии Д5А СВЧ-сигналов производства АО «НПФ «Микран»: $R_{согл} = 50 \text{ Ом}$, $C_p = 30 \text{ пФ}$ [10]. Выбор номиналов резистивного делителя $R_2 = R_3 = 1 \text{ кОм}$ производился исходя из соображений обеспечения соизмеримого выходного сопротивления детектора мощности для схемы с опорным диодом и без него.

Используя инструменты моделирования ADS [11] и описанную ранее модель диода ZB-28, была получена модель диодного детектора Д5А с температурной компенсацией.

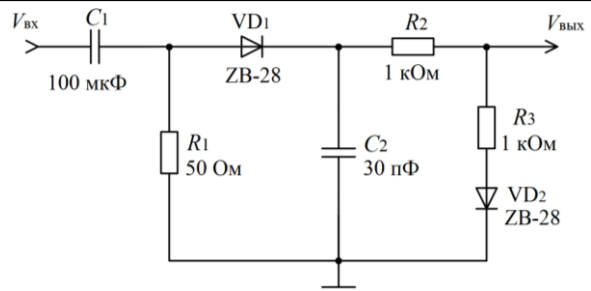


Рис. 10. Схема детектора Д5А на основе диода ZB-28 с дополнительным опорным диодом

Результаты моделирования температурного влияния на выходные показания детектора представлены на рис. 11.

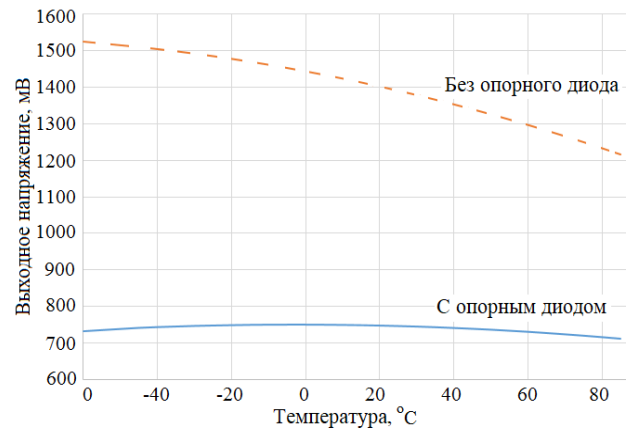


Рис. 11. Зависимость выходного напряжения от температуры на частоте 15 ГГц при $P_{вх} = 15 \text{ дБм}$

Из полученных зависимостей на рис. 11 можно рассчитать уход показаний детектора при отклонении температуры от значения $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Для интервала температур от -60 до $+25 \text{ }^\circ\text{C}$ уход показаний детектора при использовании схемы температурной компенсации уменьшился с 10 до 1,5%. Для интервала температур от 25 до $85 \text{ }^\circ\text{C}$ уход показаний уменьшился с 12 до 4%.

Для модернизации схемы и подключения опорного делителя была разработана плата микрополосковая в нескольких исполнениях в зависимости от номиналов резисторов делителя. Резисторы выполнены по тонкоплёночной технологии, номиналы резисторов 1000 Ом для варианта 1 и 2000 Ом для варианта 2. Экспериментальный образец был изготовлен на основе детектора Д5А, внутри которого дополнительно были размещены делитель напряжения и опорный диод.

После изготовления экспериментального образца были проведены испытания на устойчивость к воздействию повышенной и пониженной температуры. Во время испытаний измерялись частотные и динамические характеристики детектора мощности. Частотные характеристики представляют собой зависимость выходного напряжения детектора от частоты для различных уровней мощностей и температур. Динамические характеристики представляют собой зависимость выходного напряжения детектора от мощности на входе детектора для различных частот и температур.

Измерение частотных и динамических характеристик производилось в соответствии со схемой на рис. 12. В качестве генератора и измерителя использовался анализатор цепей скалярный P2M-18A, в качестве делителя мощности – ДМ2А-32-03Р, а также диодный детектор мощности с температурной компенсацией и диодный детектор мощности без температурной компенсации, находящиеся в термокамере. Температурные условия создавались с помощью камеры тепла и холода ВТХ-475Е [12].

Методика измерений заключается в установке в камере тепла и холода температуры в диапазоне от

–45 до +55 °С с шагом 5 °С. Далее, когда температура в камере установилась, осуществляется поддержание данной температуры в течение 5 мин. По истечении 5 мин начинается измерение частотных и динамических характеристик детекторов, и для камеры тепла и холода устанавливается новая целевая температура. После установки новой целевой температуры начинается следующее измерение.

Для более наглядного отображения результатов измерений приведены нормированные зависимости выходного напряжения от температуры при различном уровне входной мощности (рис. 13).

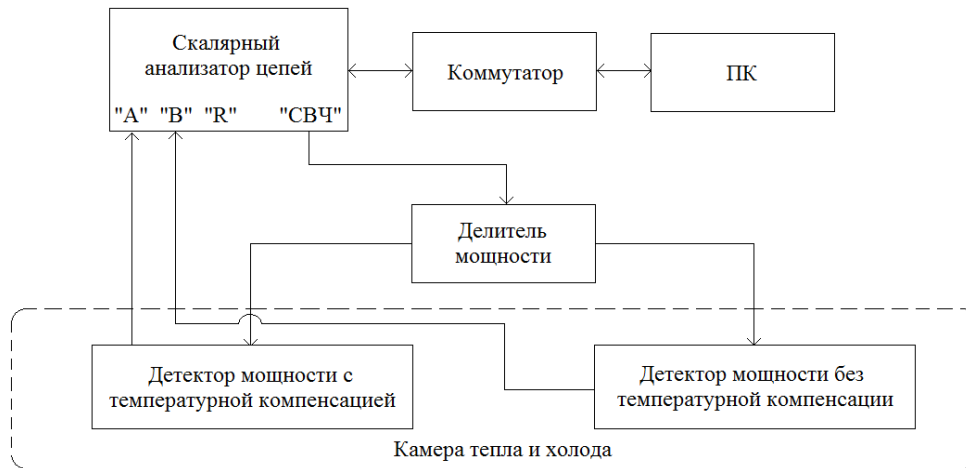


Рис. 12. Схема экспериментальной установки

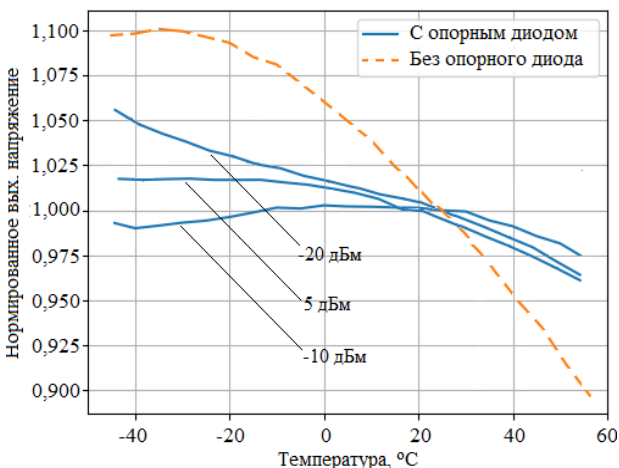


Рис. 13. Зависимость нормированного выходного напряжения от температуры для частоты 10 ГГц

Заключение

На основе аналитических выражений оценена степень влияния температуры на характеристики диодов, а именно то, что прямое падение напряжения при фиксированном токе и чувствительность диода зависят от изменения температуры.

На основе проведенных температурных испытаний экспериментального образца диодного детектора можно утверждать, что детектор Д5А с температурной компенсацией в диапазоне мощности от –30 до 10 дБм во всём частотном диапазоне имеет более стабильные результирующие характеристики,

чем детектор без температурной компенсации. Удалось уменьшить влияние температуры более чем в 16 раз для отрицательных температур и в 4 раза для положительных.

Данные исследования свидетельствуют о необходимости разработки схем детекторов и измерительных устройств на основе представленных диодов, позволяющих обеспечивать компенсацию погрешностей измерений, вызванных температурными нестабильностями.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90196.

Литература

1. Загородний А.С. Детекторы мощности сигналов СВЧ компании «Микран» / А.С. Загородний, А.В. Черепанов // СВЧ-электроника. – 2016. – № 1. – С. 52–56.
2. Калашников С.Г. Электричество: учеб. пособие. – 6-е изд. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 624 с.
3. Пасынков В.В. Полупроводниковые приборы: учеб. для вузов / В.В. Пасынков, Л.К. Чиркин. – 4-е изд. – М.: Высшая школа, 1987. – 479 с.
4. Malik R.J. et al. Planar-doped barriers in GaAs by molecular beam epitaxy // Electron Lett. – 1980. – Vol. 16, No. 22. – P. 836–838.
5. Юнусов И.В. Разработка и исследование сверхвысокочастотных гетероструктурных GaAs низкобарьерных диодов и монолитных интегральных схем на их основе: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.07. – Томск, 2017. – 151 с.
6. ZB-28. Zero Bias Diode: Preliminary Datasheet. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.micran.ru/>

upload/iblock/f54/xpl4gwobpu33ozv85k24w04dl48t00a5/ZB-28_V01.0002.pdf (дата обращения: 25.08.2023).

7. Загородный А.С. Моделирование диодов с использованием SPICE-параметров / А.С. Загородный, А.В. Дроздов, М.И. Иванова // Радиоэлектроника, электроника и энергетика: XIX Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: тез. докл.: в 4 т. – Т. 1. – М.: Изд. дом МЭИ, 2013. – 259 с.

8. Planar zero bias Schottky diode detector operating in the E-and W-band / M. Hrobak, M. Sterns, M. Schramm, W. Stein, L.P. Schmidt // Microwave Conference (EuMC). – IEEE. – 2013. – P. 179–182.

9. Нечаев В.Г. Температурная коррекция широкополосных детекторов мощности на основе низкобарьерных диодов / В.Г. Нечаев, А.И. Добриков, А.С. Загородный // Изв. высш. учеб. завед. России. Радиоэлектроника. – 2018. – № 3. – С. 79–84.

10. Каталог «Контрольно-измерительная аппаратура и элементы СВЧ-тракта» // АО «НПФ «Микран». – 2023. – 260 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.micran.ru/upload/uf/453/mtrnqdfioregh7r678571imt389yse2m/C_%D0%9A%D0%98%D0%90_RU_3.52_WEB.pdf (дата обращения: 20.06.2023).

11. Diode Detector Simulation using Agilent Technologies EEsof ADS Software, Application Note 1156 // Agilent Technologies, Inc. – 1999. – P. 1–4.

12. BTZ-475E Model Details [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://espec.com/na/products/model/btx-475> (дата обращения: 30.08.2023).

studies for the developed detector with passive temperature compensation are presented.

Keywords: diode power detector, low barrier diode, temperature testing, output voltage deviation, temperature stability.

DOI: 10.21293/1818-0442-2023-26-3-20-26

References

1. Zagorodny A.S., Cherepanov A.V. *Detektory moshchnosti signalov SVCh kompanii «Micran»* [Microwave signal power detectors of Micran company]. *SVCh-elektronika*, 2016, no. 1, pp. 52–56 (in Russ.).

2. Kalashnikov S.G. *Elektrichestvo* [Electricity]. Moscow, FIZMATLIT, 2003. 624 p. (in Russ.).

3. Pasyukov V. V., Chirkin L. K. *Poluprovodnikovyye pribory* [Semiconductor devices]. Moscow, Vysshaya shkola, 1987. 479 p. (in Russ.).

4. Malik R.J., Aucoin T.R., Ross R.L., Board K., Wood C.E.C., Eastman L.F. Planar-doped barriers in GaAs by molecular beam epitaxy, *Electronics Letters*, 1980, vol. 16, no. 22, pp. 836–838.

5. Yunusov I.V. *Razrabotka i issledovanie sverkh-vysokochastotnykh geterostrukturykh GaAs nizkoba-r'ernykh diodov i monolitnykh integral'nykh skhem na ikh osnove. Diss. kand. tekhn. nauk*, [Development and research of ultrahigh frequency heterostructural GaAs low-barrier diodes and monolithic integrated circuits based on them. Dissertation for Candidate of sciences title]. Tomsk, 2017, 151 p. (in Russ.).

6. ZB-28. Zero Bias Diode: Preliminary Datasheet, pp. 1–2. Available at: http://micran.com/sites/micran_eng/data/UserFile/pdf/mmic/ZB-28.pdf, free (Accessed: June 25, 2023) (in Russ.).

7. Zagorodny A.S., Drozdov A.V., Ivanova M.I. *Modelirovanie diodov s ispol'zovani-em SPICE-parametrov* [Simulation of diodes using SPICE parameters]. *Radioelektronika, elektronika i energetika: devyatnadsatsataya mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. studentov i aspirantov, tezisy dokladov*, Moscow, 2013, vol. 4. 259 p. (in Russ.).

8. Hrobak M., Sterns M., Schramm M., Stein W., Schmidt L.P. Planar zero bias Schottky diode detector operating in the E-and W-band, *Microwave Conference (EuMC)*, IEEE, 2013, pp. 179–182.

9. Nechaev V.G., Dobrikov A.I., Zagorodny A.S. *Temperaturnaya korrektsiya shirokopolosnykh detektorov moshchnosti na osnove nizkobar'ernykh diodov* [Temperature correction of broadband power detectors based on low-barrier diodes] *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii Rossii. Radioelektronika*, 2018, no. 3, pp. 79–84 (in Russ.).

10. Katalog «Kontrol'no-izmeritel'naya apparatura i elementy SVCh trakta», АО «НПФ «Микран», 2023, 260 p. Available at: https://www.micran.ru/upload/uf/453/mtrnqdfioregh7r678571imt389yse2m/C_%D0%9A%D0%98%D0%90_RU_3.52_WEB.pdf, free/ (Accessed: June 20, 2023) (in Russ.).

11. Diode Detector Simulation using Agilent Technologies EEsof ADS Software, Application Note 1156, Agilent Technologies, Inc., 1999, pp. 1–4.

12. BTZ-475E Model Details. Available at: <https://espec.com/na/products/model/btx-475>, free (Accessed: August 30, 2023).

Нечаев Владимир Геннадьевич

Аспирант каф. сверхвысоких частот и квантовой радиотехники (СВЧКР) Томского государственного ун-та систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-999-495-65-28
Эл. почта: ne4aev.volodya@yandex.ru

Загородный Андрей Сергеевич

Канд. техн. наук, доцент каф. СВЧКР ТУСУРА Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-923-414-99-26
Эл. почта: andreyzag@micran.ru

Заболоцкий Александр Михайлович

Д-р техн. наук, доцент, зав. каф. СВЧКР ТУСУРА Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 41-34-39
Эл. почта: zabolotsky_am@mail.ru

Nechaev V.G., Zagorodny A.S., Zabolotsky A.M.

Passive compensation of temperature instability of microwave diode power detectors

The article presents the results of a study of the temperature effect on the characteristics of low-barrier ZB-28 diodes with a cutoff frequency over 100 GHz and diode detectors of microwave signal power based on them. A method is proposed to compensate the temperature instability of detectors, implemented by including an additional reference diode in the diode detector circuit. The main results presented of experimental

Vladimir G. Nechaev

Postgraduate student, Department of Microwave and Quantum Radio Engineering, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR) 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-999-495-65-28
Email: nechaev.vg@micran.ru

Andrey S. Zagorodny

Candidate of Sciences in Engineering, Associate Professor,
Department of Microwave and Quantum Radio Engineering,
TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-923-414-99-26
Email: andreyzag@micran.ru

Aleksandr M. Zabolotsky

Doctor of Sciences in Engineering, Associate Professor,
Senior Researcher, Department of Microwave and Quantum
Radio Engineering, TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 41-34-39
Email: zabolotsky_am@mail.ru

УДК 621.372.2

И.В. Хмара, Д.С. Данилов, В.Н. Гребенюк, А.С. Загородний, С.Н. Шарангович

Сверхширокополосный рin-диодный диплексерный переключатель на GaAs

Предложена схема сверхширокополосного рin-диодного переключателя на два канала с разными диапазонами рабочих частот: 0–18 и 18–26,5 ГГц. Представлена модель топологии монолитной интегральной схемы (МИС), выполненной на основе квазивертикальных GaAs рin-диодов технологии АО «НПФ «Микран». Выполнено сравнение результатов моделирования и экспериментальных данных измерений изготовленных МИС. Использование интегральной схемы переключателя возможно в составе коммутационных узлов измерительной СВЧ-техники.

Ключевые слова: переключатель, коммутатор, сверхширокополосный, диплексер, рin-диод, монолитная интегральная схема, арсенид галлия.

DOI: 10.21293/1818-0442-2023-26-3-27-31

Для коммутации СВЧ-сигналов нередко используют переключатели на основе рin-диодов или транзисторов [1]. Для обеспечения работы на высоких частотах и достижения широкого диапазона частот к нелинейным элементам и схемотехническим решениям предъявляются довольно сложные и противоречивые требования. Требование работы от постоянного тока до десятков гигагерц нередко существенно усложняет задачу.

Работа посвящена разработке схемотехнического решения переключателя СВЧ-сигналов на два канала с обеспечением фильтрации частот разных диапазонов в каждом канале. Другими словами, реализация в одной схеме диплексера и переключателя.

Диплексер – это трехпортовое пассивное устройство, выполняющее мультиплексирование (объединение) и демultipлексирование (разделение) СВЧ-сигнала по частоте. Обычно он имеет два канала: низкочастотный (НЧ) и высокочастотный (ВЧ), которые настраиваются на необходимый диапазон частот. Настройка происходит с помощью установки в тракты каналов селективных устройств – СВЧ-фильтров [2].

Большинство реализаций данных устройств приходится на микрополосковые структуры в различных исполнениях. Используются они в основном для разделения и суммирования сигналов, поступающих с одной приемопередающей антенны. Как правило, их применяют в сотовой связи различного поколения в диапазоне 800–2600 МГц [3]. Более широкополосные схемы представлены в работах [4–6]. Они реализованы на подвесных микрополосковых линиях передач, обеспечивают диапазон частот от 0 до 100 ГГц и предназначены для использования в беспроводных системах и в блоках измерительной аппаратуры.

Стоит отметить о существовании переключаемых диплексеров. В отечественной литературе данные устройства широко не представлены. В зарубежных источниках есть ряд схем, где описывается их основное отличие от пассивного диплексера [7–10]. В данных устройствах применяется встроенный коммутационный элемент, благодаря которому можно включать/отключать дополнительные плечи диплексера, имеющие различные полосы частот.

Диплексерный переключатель схож с типовым коммутатором, в порты которого устанавливаются селективные компоненты. Данная реализация позволяет осуществлять различные полосы пропускания на разных каналах коммутатора. Устройства с такой реализацией в литературе не представлены.

В качестве коммутационного элемента переключатели зачастую используют GaAs-рin-диоды или GaAs-полевые транзисторы с затвором Шоттки (ПТШ) [11, 12]. По сравнению с ПТШ, рin-диоды обладают значительно меньшей удельной емкостью в закрытом состоянии и меньшим удельным сопротивлением в открытом состоянии, что дает им основное преимущество для эффективной работы на высоких частотах (до 100 ГГц, в то время как коммутаторы на ПТШ, в зависимости от длины затвора, используются на практике в диапазоне до 60 ГГц) [13]. Кроме того, рin-диодные переключатели характеризуются меньшими вносимыми потерями открытого канала и более высокой коммутируемой мощностью в сравнимой полосе частот [11, 12].

Представлены результаты разработки диплексерного переключателя на базе GaAs-рin-диодной технологии, который обеспечивает коммутацию двух диапазонов: НЧ-тракта от постоянного тока до 18 ГГц и ВЧ-тракта от 18 до 26,5 ГГц с минимальными вносимыми потерями.

Разработка диплексерного переключателя

При разработке диплексерного переключателя за основу была взята схема классического рin-диодного двухканального коммутатора, которая представлена на рис. 1 [12, 14, 15]. Вносимые потери такого переключателя, реализованного в интегральном исполнении, обычно не превышают 1–2 дБ и имеют хорошую изоляцию в широкой полосе частот [11, 12, 16].

В области низких частот около 10 МГц и ниже (зависит от размера I-слоя диода) при прямом прохождении сигнала через последовательно включенный рin-диод возникают нелинейные искажения и большие вносимые потери [1, 15]. Исходя из этого, главным недостатком данной схемы (рис. 1) является невозможность работы на самых низких частотах. Установленные на входах каждого порта конденсаторы также ограничивают нижнюю границу рабочей частоты.

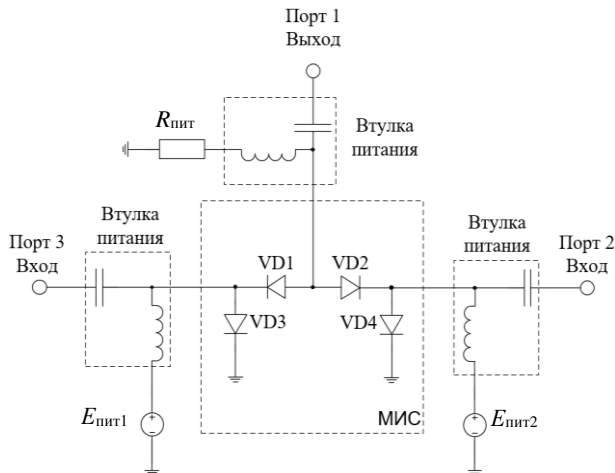


Рис. 1. Принципиальная схема коммутатора на 2 канала

На рис. 2 представлены разработанная схема и модель спроектированной топологии МИС pin-диод-

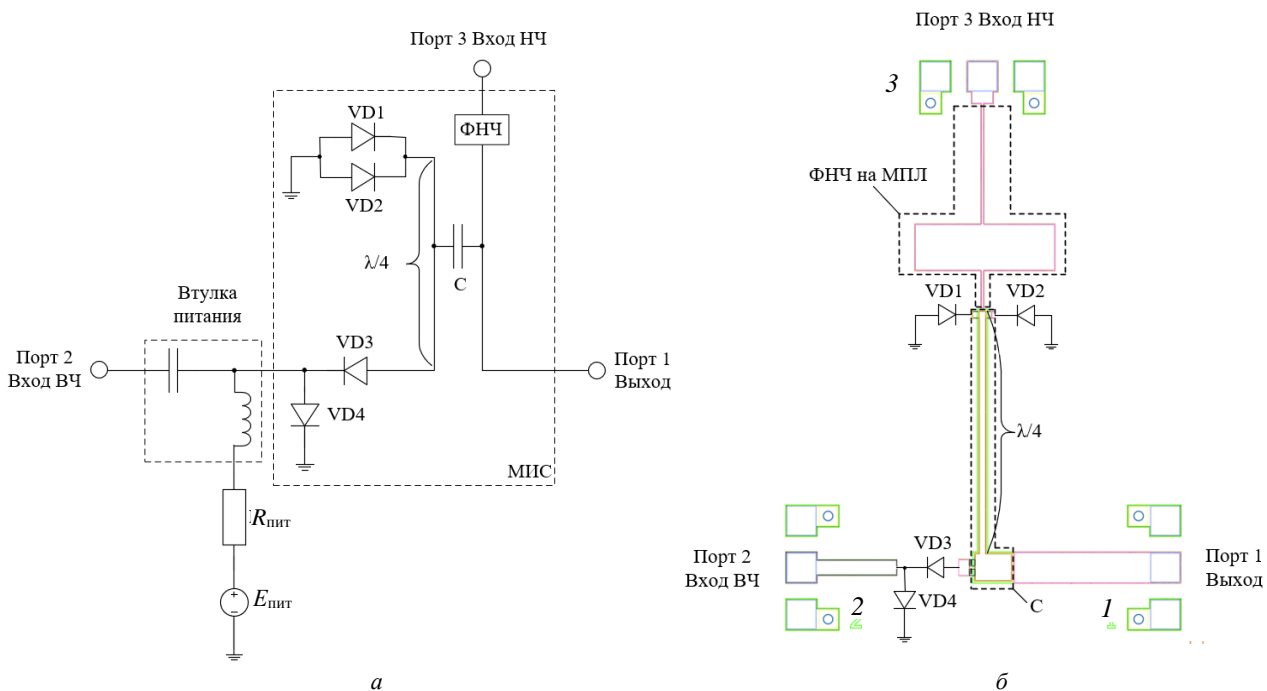


Рис. 2. Принципиальная схема (а) и модель топологии (б) диплексерного переключателя

Диапазон рабочих частот ВЧ-тракта (18–26,5 ГГц) определяется короткозамкнутым четвертьволновым шлейфом. Оба плеча разделены по постоянному току через топологически реализованный конденсатор C . По верхней его обкладке протекает управляющий ток диодов, а по нижней распространяются сигналы НЧ-канала. Данная реализация позволяет не использовать блокировочные конденсаторы на портах 1 и 3. Ко всему прочему короткозамкнутый шлейф длиной $\lambda/4$ (верхняя обкладка конденсатора) обеспечивает изоляцию между портами 3–2 в режиме работы ВЧ-канала по формуле

$$Z_{\text{вх}} = \frac{Z_0^2}{Z_{\text{н}}},$$

ного диплексерного переключателя диапазона 0–18–26,5 ГГц [17].

Переключение каналов предложенной схемы осуществляется внешней цепью питания посредством постоянного тока, величина которого ограничивается резистором $R_{\text{пит}}$. Подача положительного напряжения через втулку питания обеспечивает режим работы НЧ-канала. В этом случае pin-диод $VD4$ открыт (смещен в область положительного напряжения вольт-амперной характеристики), $VD3$ закрыт, что препятствует прохождению сигнала с порта 2 на порт 1.

Отрицательное напряжение, поданное через втулку питания, приведет к обратной ситуации, тем самым обеспечивая режим работы ВЧ-канала. При этом pin-диоды $VD1, VD2$ будут открыты.

НЧ-канал включает в свой тракт фильтр нижних частот (ФНЧ), который определяет его полосу пропускания (0–18 ГГц).

где $Z_{\text{вх}}$ – входное сопротивление шлейфа; Z_0 – волновое сопротивление на участке; $Z_{\text{н}}$ – сопротивление нагрузки шлейфа. Согласно формуле, для увеличения изоляции, которая обеспечивается путем увеличения $Z_{\text{вх}}$, следует стремиться к уменьшению $Z_{\text{н}}$.

Включение двух pin-диодов $VD1$ и $VD2$ на землю и обеспечение их «открытого» состояния путем протекания управляющего тока позволяет достичь близкого к нулю эквивалентного сопротивления и как следствие высокого уровня развязки. Таким образом, нивелируется необходимость pin-диода на проход в тракте НЧ, как это обычно применимо в классических схемах переключателей (см. рис. 1). Совокупно это решает главную задачу – прохождение через данный канал сигналов низкой частоты вплоть до постоянного тока.

Результаты и обсуждение

На основе разработанной модели диплексерного переключателя были изготовлены тестовые образцы МИС. В качестве коммутационного элемента использовался рin-диод с диаметром базы 26 мкм производства АО «НПФ «Микран».

Измерения МИС проводились на пластине при помощи зондовой станции и векторного анализатора цепей. Измерялись данные в двух режимах работы в

диапазоне от 500 МГц до 26,5 ГГц. Переключение каналов обеспечивалось через втулку питания на 2-м порту при значениях тока ± 10 мА.

Графики сравнения электродинамического моделирования и измерения на кристалле представлены на рис. 3–5: потери на проход (см. рис. 3), возвратные потери (см. рис. 4), изоляция между каналами (см. рис. 5).

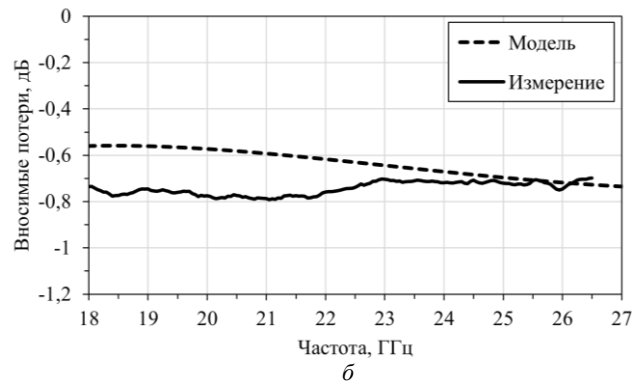
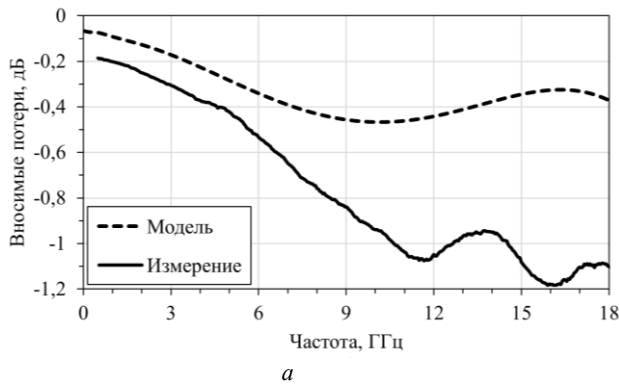


Рис. 3. Вносимые потери каналов: НЧ: 0–18 ГГц (а); ВЧ: 18–26,5 ГГц (б)

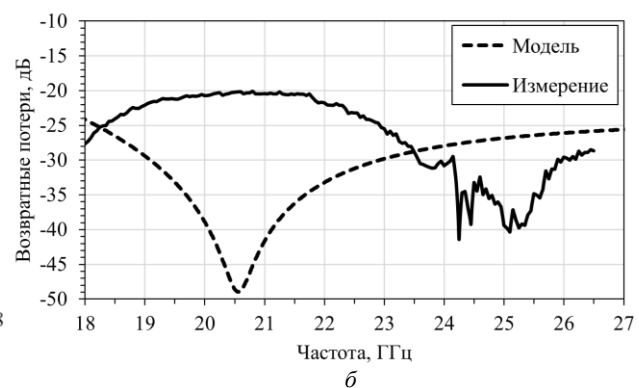
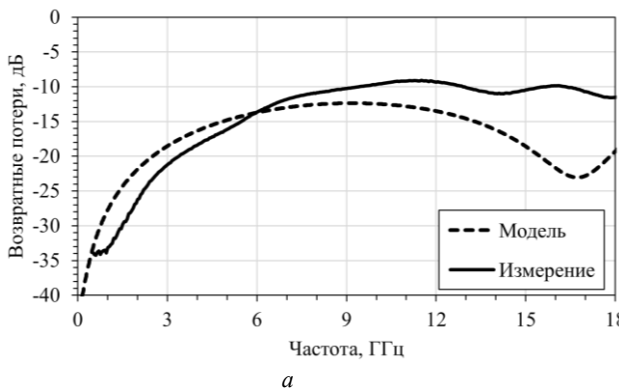


Рис. 4. Возвратные потери порта 1 при работе каналов: а – НЧ: 0–18 ГГц ; б – ВЧ: 18–26,5 ГГц

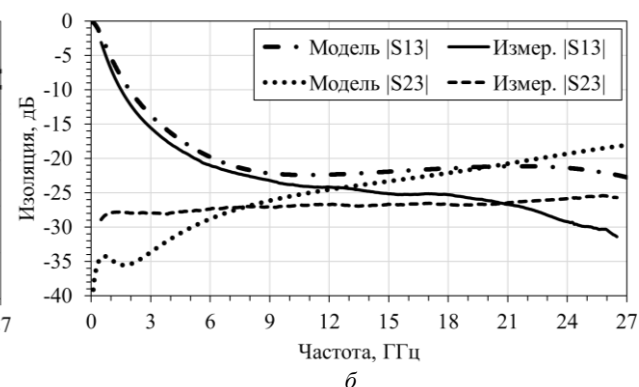
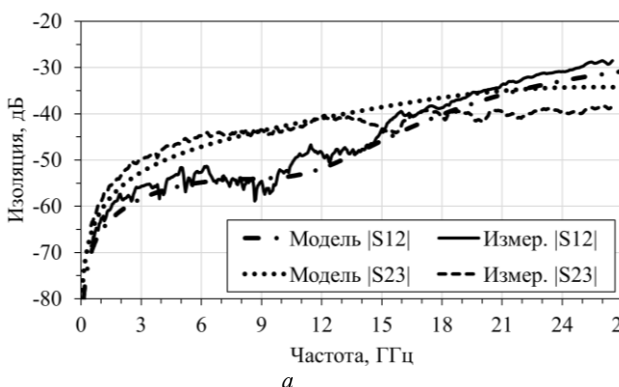


Рис. 5. Изоляция между каналами при работе плеча: а – НЧ: 0–18 ГГц ; б – ВЧ: 18–26,5 ГГц

Исходя из результатов измерений (см. рис. 3–5), можно говорить о работоспособности предложенной схемы в заданном диапазоне частот. Потери на проход для обоих каналов составили не более 1,2 дБ, возвратные потери – не более –9 дБ, благодаря хорошо согласованному тракту как НЧ-, так и ВЧ-канала. Изоляция между портами 2–3 при работе ВЧ-канала составила не менее 25 дБ. Это удалось обеспечить за

счет реализованной короткозамкнутой четвертьволновой линии. Изоляция между портами 1–3 при работе ВЧ-канала не обеспечивается во всем диапазоне частот. Сигналы с частотами менее 3 ГГц будут проходить на выход порта 3 с недостаточным ослаблением. В связи с этим использование данной микросхемы предполагает поочередную подачу сигнала на входы 2 и 3.

Заключение

В результате предложенного схемотехнического решения, численного моделирования и экспериментального исследования диплексерного переключателя сверхширокополосных сигналов были изготовлены тестовые образцы МИС. Результаты измерения подтвердили работоспособность предложенной схемы. Потери на проход составили не более 1,2 дБ, возвратные потери – не более –9 дБ, изоляция не менее 25 дБ в диапазоне частот от 0 до 26,5 ГГц.

Разработанная МИС используется в коммутационных узлах контрольно-измерительной аппаратуры АО «НПФ «Микран».

Литература

1. Дзехцер Г.Б. р-и-п-диоды в широкополосных устройствах СВЧ / Г.Б. Дзехцер, О.С. Орлов. – М.: Сов. радио, 1970. – 200 с.
2. Cameron R.J. Microwave Filters for Communication Systems: Fundamentals, Design, and Applications / R.J. Cameron, C.M. Kudsia, R.R. Mansour. – 2nd ed. – Hoboken: Wiley & Sons, 2018. – 929 p.
3. Хачатрян Л.Х. Проектирование сверхвысокочастотного диплексера с высокой изоляцией выходных каналов / Л.Х. Хачатрян, А.Г. Степанян // Вестник НПУА. – 2022. – № 1. – С. 106–113.
4. Ashiq I. Ultra-broadband contiguous planar DC-35–65 GHz diplexer using softboard suspended stripline technology / I. Ashiq, A.P.S. Khanna // 2013 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (MTT). – 2013. – P. 1–4. DOI: 10.1109/MWSYM.2013.6697689.
5. Ashiq I. A novel ultra-broadband DC-36-to-66-GHz hybrid diplexer using waveguide and SSL technology / I. Ashiq, A. Khanna // 2014 44th European Microwave Conference. – 2014. – P. 1111–1114. DOI: 10.1109/EuMC.2014.6986634.
6. Ashiq I. A novel planar contiguous diplexer DC-67–100 GHz using Organic Liquid Crystal Polymer (LCP) / I. Ashiq, A.P.S. Khanna // 2015 IEEE MTT-S International Microwave Symposium. – 2015. – P. 1–4. DOI: 10.1109/MWSYM.2015.7167091.
7. Chuang M.-L. Microstrip multiplexer and switchable diplexer with joint T-shaped resonators / M.-L. Chuang, M.-T. Wu // IEEE Microw. Wireless Compon. Lett. – 2014. – P. 309–311. DOI: 10.1109/LMWC.2014.2309084.
8. Microstrip switchable diplexer based on dual-mode stub-loaded stepped-impedance resonators with three operating states / C.-F. Chen, R.-Y. Chen, K.-W. Zhou, Y.-H. He // Electronics Letters. – 2019. – Vol. 55, No. 22. – P. 1188–1190.
9. Switchable diplexer with high isolation using terminated T-shaped resonator for 5G communications / C. Teng, S.-K. Ho, K.-W. Tam, W.-W. Choi // In IEEE MTT-S Int. Wireless Symposium (IWS). – 2019. – P. 1–3. DOI: 10.1109/IEEE-IWS.2019.8804141.
10. Switchable diplexer based on coupling control / J.-X. Xu, W.-L. Zhan, H.-Y. Li, X.Y. Zhang // IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs. – 2021. – P. 166–170. DOI: 10.1109/TCSII.2020.3003913.
11. Mizutani H. DC-110-GHz MMIC Traveling-Wave Switch / H. Mizutani, Y. Takayama // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2000. – Vol. 48, No. 5. – P. 840–845. DOI: 10.1109/22.841881.
12. Гушин В.А. СВЧ МИС на основе GaAs-pиn-диодов для управления амплитудой сигнала в диапазоне частот 4–27 ГГц / В.А. Гушин, И.В. Юнусов, А.Ю. Плотникова // Доклады ТУСУР. – 2014. – Т. 33, № 3. – С. 70–74.
13. Монолитные интегральные схемы GaAs-pиn-диодных коммутаторов СВЧ / И.В. Юнусов, А.М. Ющенко, А.Ю. Плотникова и др. // Сб. докла. Всерос. конф. «Микроэлектроника СВЧ». – СПб., 2012. – С. 93–96.
14. The pin diode circuit designer's handbook. – Microsemi-Corporation, 1998. – 137 p. [Электронный ресурс]. – URL: https://www.ieee.li/pdf/essay/pin_diode_handbook.pdf, свободный (дата обращения: 12.06.2023).
15. Hiller G. Design with PIN Diodes: Application Note AG312. – M/A-COM. – 18 p. [Электронный ресурс]. – URL: <https://cdn.macom.com/applicationnotes/AG312.pdf>, свободный (дата обращения: 16.06.2023).
16. 10-MHz-to-70-GHz Ultra-Wideband Low-Insertion-Loss SPST and SPDT Switches Using GaAs pin Diode MMIC Process / H.-E. Liu, X. Lin, H.-Y. Chang, Y.-C. Wang // 2018 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC). – 2018. – P. 1217–1219. DOI: 10.23919/APMC.2018.8617438.
17. Схемное решение для сверхширокополосных переключаемых GaAs-pиn-диодных диплексеров / И.В. Хмара, В.Н. Гребенюк, Д.С. Данилов, А.С. Загородний, С.Н. Шарангович // Научная сессия ТУСУР–2023: сб. избр. статей междунар. науч.-тех. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых: в 3 ч. – Ч. 1. – Томск: ТУСУР; В-Спектр, 2023. – С. 72–77.

Хмара Иоанн Владимирович

Аспирант каф. сверхвысоких частот и квантовой радиотехники (СВЧиКР) Томского государственного ун-та систем управления и радиотехники (ТУСУР) Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-913-870-49-22
Эл. почта: hmara.iv@micran.ru

Данилов Даниил Сергеевич

Аспирант каф. конструирования узлов и деталей радиоэлектронной аппаратуры (КУДР) ТУСУРа Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-953-923-68-46
Эл. почта: danilov.ds@micran.ru

Гребенюк Владимир Николаевич

Руководитель группы разработки СВЧ-узлов и модулей департамента информационно-измерительных систем АО «НПФ «Микран» Кирова пр-т, 51д, г. Томск, Россия, 634041
Тел.: +7 (382-2) 90-00-29, внут.: 2333
Эл. почта: gvn@micran.ru

Загородний Андрей Сергеевич

Канд. техн. наук, доцент каф. СВЧиКР ТУСУРа Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 90-00-29, внут.: 2317
Эл. почта: andreyzag@micran.ru

Шарангович Сергей Николаевич

Канд. физ.-мат. наук, проф., с.н.с. каф. СВЧиКР ТУСУРа Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0002-2195-2786
Тел.: +7 (382-2) 70-15-18
Эл. почта: shr@tusur.ru

Khmara I.V., Danilov D.S., Grebenyuk V.N., Zagorodniy A.S., Sharangovich S.N.

Ultra-Wideband pin-diode diplexer switch on GaAs

The article presents a circuit of an ultra-wideband pin-diode switch for two channels with different operating frequency ranges: DC-18 GHz and 18–26.5 GHz. A topology model of a microwave monolithic integrated circuit (MMIC) based on quasi-vertical GaAs pin diode technology of Micran JSC is described. Comparison of simulation results and experimental measurement data of manufactured MMICs is performed. The use of the integrated circuit of the switch is possible as a part of the switching nodes of the measuring microwave equipment.

DOI: 10.21293/1818-0442-2023-26-3-27-31

References

1. Dzekhtser G.B., Orlov O.S. *p-i-n diody v shirokopolosnykh ustroystvakh SVCh* [p-i-n diodes in broadband microwave devices]. Moscow, Sov. radio, 1970, 200 p. (in Russ.).
2. Cameron R.J., Mansour R.R. *Microwave Filters for Communication Systems: Fundamentals, Design, and Applications*. 2nd ed, Hoboken: Wiley & Sons, 2018, 929 p.
3. Khachatryan L.Kh., Stepanyan A.G. *Proektirovanie sverkhvysokochastotnogo dipleksera s vysokoi izolyatsiei vykhodnykh kanalov* [Designing an ultrahigh frequency diplexer with high isolation of output channels]. *Proceedings of NPUA*, 2022, no. 1, pp. 106–113 (in Russ.).
4. Ashiq I., Khanna A.P.S. Ultra-broadband contiguous planar DC-35–65 GHz diplexer using softboard suspended stripline technology. *2013 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (MTT)*, 2013, pp. 1–4. DOI: 10.1109/MWSYM.2013.6697689.
5. Ashiq I., Khanna A. A novel ultra-broadband DC-36-to-66-GHz hybrid diplexer using waveguide and SSL technology. *2014 44th European Microwave Conference*, 2014, pp. 1111–1114. DOI: 10.1109/EuMC.2014.6986634.
6. Ashiq I., Khanna A.P.S. A novel planar contiguous diplexer DC-67-100 GHz using Organic Liquid Crystal Polymer (LCP) *2015 IEEE MTT-S International Microwave Symposium*, 2015, pp. 1–4. DOI: 10.1109/MWSYM.2015.7167091.
7. Chuang M.-L., Wu M.-T. Microstrip multiplexer and switchable diplexer with joint T-shaped resonators *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2014, pp. 309–311. DOI: 10.1109/LMWC.2014.2309084.
8. Chen C.-F., Chen R.-Y., Zhou K.-W., He Y.-H. Microstrip switchable diplexer based on dual-mode stub-loaded stepped-impedance resonators with three operating states *Electronics Letters*, 2019, vol. 55, no. 22, pp. 1188–1190.
9. Teng C., Ho S.-K., Tam K.-W., Choi W.-W. Switchable diplexer with high isolation using terminated T-shaped resonator for 5G communications *In IEEE MTT-S International Wireless Symposium (IWS)*, 2019, pp. 1–3. DOI: 10.1109/IEEE-IWS.2019.8804141.8.
10. Xu J.-X., Zhan W.-L., Li H.-Y., Zhang X.6Y. Switchable diplexer based on coupling control *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2021, pp. 166–170. DOI: 10.1109/TCSII.2020.3003913.
11. Mizutani H., Takayama Y. DC–110-GHz MMIC Traveling-Wave Switch *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2000, vol. 48, no. 5. pp. 840–845. DOI: 10.1109/22.841881.
12. Yunusov I.V., Yushchenko A.M., Plotnikova A.Yu., Arykov V.S., Barov A.A. *SVCh MIS na osnove GaAs-pin-diodov dlya upravleniya amplitudoi signala v diapazone chastot 4–27 GGts* [MMIC based on GaAs-pin diodes for controlling the signal amplitude in the frequency range 4–27 GHz]. *Proceedings of TUSUR University*, 2014, no. 3, pp. 70–74 (in Russ.).

13. Gushchin V.A., Yunusov I.V., Plotnikova A.Yu. *Monolitnye integral'nye skhemy GaAs-pin-diodnykh kom-mutatorov SVCh* [Monolithic integrated circuits of GaAs-pin-diode microwave switches]. *Scientific and Technical Conference «Microwave microelectronics»*, St. Petersburg, 2012, pp. 93–96 (in Russ.).

14. The pin diode circuit designer's handbook. *Microsemi-Corporation*, 1998. 137 p. Available at: https://www.ieee.li/pdf/essay/pin_diode_handbook.pdf, free (Accessed: June 12, 2023).

15. Hiller G. Design with PIN Diodes: Application Note AG312. *M/A-COM*. 18 p. Available at: <https://cdn.macom.com/applicationnotes/AG312.pdf>, free (Accessed: June 16, 2023).

16. Liu H.-E., Lin X., Chang H.-Y., Wang Y.-C. 10-MHz-to-70-GHz Ultra-Wideband Low-Insertion-Loss SPST and SPDT Switches Using GaAs-pin-Diode MMIC Process. *2018 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC)*, 2018, pp. 1217–1219. DOI: 10.23919/APMC.2018.8617438.

17. Khmara I.V., Grebenyuk V.N., Danilov D.S., Zagorodniy A.S., Sharangovich S.N. *Skhemo reshenie dlya sverkhshirokopolosnykh pereklyuchaemykh GaAs pin-diodnykh diplekserov* [Circuit solution for ultra-wideband switchable GaAs pin-diode diplexers] *Scientific and Technical Conference «TUSUR Scientific Session»*, in 3 parts, part 1, Tomsk: TUSUR; V-Spectr, 2023, pp. 72–77 (in Russ.).

Ioann V. Khmara

Postgraduate student, Department of Microwave and Quantum Radio Engineering, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-913-870-49-22
E-mail: hmara.iv@micran.ru

Daniil S. Danilov

Postgraduate student, Department of Design of Units and Components for Radioelectronic Systems, TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-953-923-68-46
Email: danilov.ds@micran.ru

Vladimir N. Grebenyuk

Head of the Development group of microwave nodes and modules, Micran JSC
51d, Kirov pr., Tomsk, Russia, 634041
Phone: +7 (382-2) 90-00-29, ext.: 2333
Email: gvn@micran.ru

Andrey S. Zagorodniy

Candidate of Sciences in Engineering, Associate Professor, Department of Microwave and Quantum Radio Engineering, TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 90-00-29, ext.: 2317
Email: andreyzag@micran.ru

Sergey N. Sharangovich

Candidate of Sciences in Physics and Mathematics, Professor, Senior Researcher, Department of Microwave and Quantum Radio Engineering, TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0002-2195-2786
Phone: +7 (382-2) 70-15-18
Email: shr@tusur.ru

Н.И. Гоголев, А. Салих, Д.С. Брагин, В.Д. Дмитриев

Исследование характеристик усилителя распределенного усиления на основе GaAs-полевых транзисторов

Усилитель распределенного усиления является актуальным решением при реализации широкополосных усилителей в системах беспроводной связи, импульсной и измерительной техники. В настоящей работе было проведено исследование усилителя распределенного усиления на основе GaAs-полевых транзисторов. В работе представлен расчет оптимального количества ячеек усиления, расчет каскадного усилителя распределенного усиления и получена его принципиальная схема, работающая в диапазоне от 2 до 20 ГГц. Также был выполнен предварительный расчет основных характеристик усилителя, на базе которого модель усилителя распределенного усиления была построена и промоделирована в САПР. Помимо этого, в работе были проанализированы изменения коэффициента передачи и уровня выходной мощности в точке сжатия на 1 дБ от количества используемых ячеек усиления. Результаты данной работы могут быть использованы при проектировании усилителей распределенного усиления для различных систем в современной электронике.

Ключевые слова: арсенид галлия (GaAs), НЕМТ, каскод, УРУ, широкая полоса частот.

DOI: 10.21293/1818-0442-2023-26-3-32-40

Увеличение быстродействия современных устройств – одна из ключевых тенденций развития современной радиотехники. Одним из таких устройств является широкополосный усилитель, к которому относят схему усилителя распределенного усиления (УРУ), работающую по принципу направленного сложения высокочастотных сигналов. Усилители данного типа применяются как в спутниковых и радиолокационных системах, так и в системах мобильной связи третьего (3G), четвертого (4G) и пятого (5G) поколений [1].

С развитием полупроводниковых технологий архитектуры распределенных усилителей мощности постоянно улучшались, чтобы соответствовать постоянно растущим к ним требованиям. По своей сути усилитель распределенного усиления является управляющим устройством и определяет такие характеристики системы, как коэффициент полезного действия (КПД), линейность и коэффициент усиления (КУ) [2].

С момента изобретения распределенного усилителя Персивалем в 1936 г. были приложены значительные усилия для улучшения коэффициента усиления

[3–7], полосы пропускания (ПП) [8–12], эффективности [13], мощности [14–19] и шумовых характеристик [20, 21]. Однако все еще важным является вопрос разработки метода, позволяющего с достаточной точностью и достоверностью определять как оптимальное количество ячеек усиления, так и уровень выходной мощности в точке сжатия на 1 дБ, т.е. при таком ее уменьшении из-за нелинейных искажений.

В отличие от обычного каскадного или балансного усилителя распределенный усилитель (рис. 1) использует несколько иной подход к широкополосному усилению, а именно параллельное расположение транзисторов. Полевые транзисторы с последовательно включенными катушками индуктивности ведут себя как эффективный фильтр нижних частот. При замыкании этих линий резистивными нагрузками отраженные сигналы поглощаются в балансной нагрузке, а полезные сигналы суммируются синфазно на выходе усилителя. Входные и выходные емкости транзисторов, так называемые паразитные, входят в состав LC-фильтров нижних частот (ФНЧ). Подобная структура позволяет расширить полосу пропускания усилителя [22].

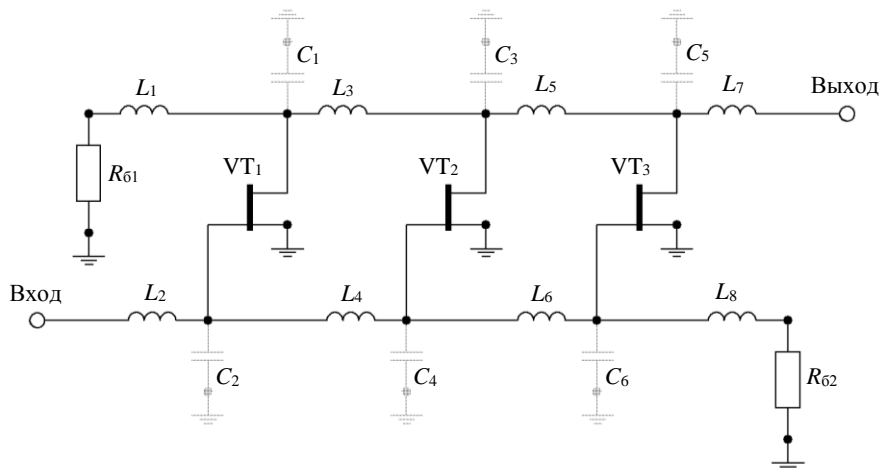


Рис. 1. Принципиальная схема УРУ с общим истоком (ОИ)

Для получения высокой выходной мощности часто применяют схему с общим истоком и неоднородной структурой УРУ [23]. Недостатком такого вида схем является низкая развязка между входом и выходом, что приводит к режиму самовозбуждения особенно на высоких частотах.

Наиболее распространенный вид схемы усилителя с распределенным усилением, а именно каскод (рис. 2). Широко используется схема каскода общий исток – общий затвор (ОИ – ОЗ). Подобная структура характеризуется высоким максимально достижимым коэффициентом усиления, широкой полосой пропускания и улучшенной развязкой вход-выход.

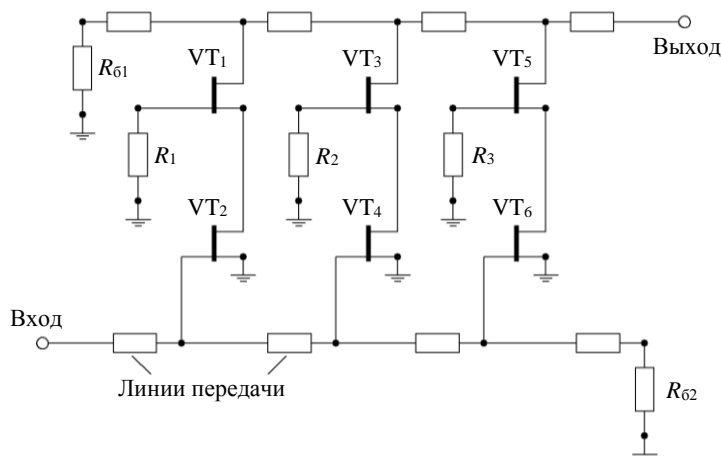


Рис. 2. Электрическая схема каскодного УРУ

По сравнению с классической схемой УРУ реализация каскодной схемы усложняется, в связи с чем необходимо оценивать дополнительные аспекты, такие как увеличение потребления мощности на постоянном токе, стабильность каскодной ячейки и увеличение напряжения на стоке, которое делится между собой общим затвором и общим истоком транзисторов. Тем не менее каскодная схема может обеспечить максимально возможный коэффициент усиления в широкой полосе пропускания. Основными проблемами при использовании каскодной структуры являются нестабильность усилителя из-за индуктивных паразитных элементов, а также ухудшение линейности УРУ [24–26].

Исходя из работы [27], можно сказать, что техпроцесс GaAs-pHEMT является самой часто используемой технологией. Связано это как с дороговизной производства таких УРУ, так и с тем, что не у всех производителей имеется стабильная GaN-HEMT-технология. Такие компании, как АО «Светлана-Рост» и МАСОМ, ведут активные исследования в области применения GaN-HEMT-технологии в УРУ для последующей реализации полученных решений.

Усилитель распределенного усиления является актуальным решением для реализации широкополосных усилителей. Усилители на основе GaAs получили широкое распространение на рынке микроэлек-

троники за счет оптимального компромисса с точки зрения стоимости, электрических характеристик и стабильности.

Для обеспечения уровня коэффициента усиления и выходной мощности, сравнимого с аналогами на рынке, выбор был сделан в пользу каскодной схемы УРУ.

Расчет основных параметров УРУ

Для питания всей микросхемы усилителя необходимы 3,5 В, а потребляемый ток каждой ячейки усиления составляет 13 мА. Реализация высокочастотных схем на полевых МОП-транзисторах (рис. 3) затруднена из-за множества факторов. Например, элементы, которые могут уменьшить коэффициент усиления или полосу пропускания усилителя на основе полевого транзистора, – это паразитные емкости и сопротивления (см. рис. 3). Паразитные сопротивления R_s, R_g, R_d рассеивают мощность, в то время как паразитные емкости C_{gd}, C_{ds} образуют пути с низким импедансом на высоких частотах, тем самым уменьшая достижимый коэффициент усиления. Основная проблема кроется в паразитной емкости C_{gs} .

Предварительный расчет усилителя распределенного усиления необходим для определения основных параметров, таких как оптимальное количество ячеек усиления и предполагаемая максимальная выходная мощность усилителя.

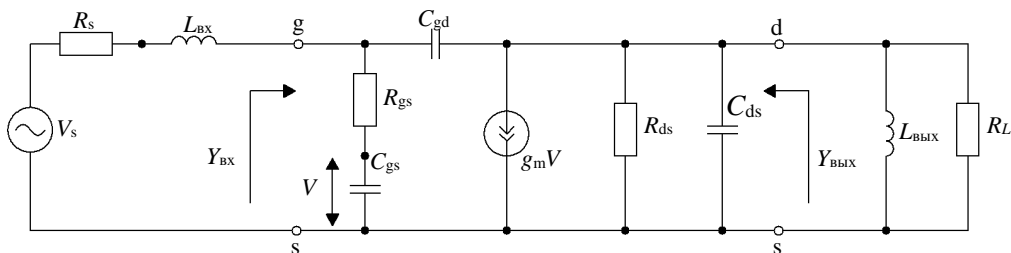


Рис. 3. Эквивалентная схема GaAs-полевого транзистора: s – исток; g – затвор; d – сток

Помимо этого, предварительный расчет помогает определить индуктивность стоковой и затворной линии, которую необходимо учитывать при проектировании схемы на LC -элементах, а также длину линии передачи, необходимую при проектировании топологии УРУ.

Данные, необходимые для предварительного расчета, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Входные данные для предварительного расчета УРУ

Параметр	Значение	Ед. изм.
Крутизна транзистора, g_m	0,02632	См
Граничная частота транзистора, ω	125	ГГц
Паразитная емкость затвор-исток, C_{gs}	0,05114	пФ
Паразитная емкость затвор-сток, C_{gd}	0,01497	пФ
Паразитная емкость сток-исток, C_{ds}	0,01432	пФ
Паразитное сопротивление затвор-исток, R_{gs}	16,34	Ом
Паразитное сопротивление сток-исток, R_{ds}	590,4	Ом

Основные электрические свойства транзистора, такие как паразитные емкости и сопротивления (см. рис. 3), могут быть охарактеризованы его Y -параметрами, которые рассчитываются по формулам (1)–(4) [28]:

$$Y_{11} = \frac{j \cdot \omega \cdot C_{gs}}{1 + j \cdot \omega \cdot C_{gs} \cdot R_{gs}} + j \cdot \omega \cdot C_{gd}, \quad (1)$$

$$Y_{12} = -j \cdot \omega \cdot C_{gd}, \quad (2)$$

$$Y_{21} = \frac{g_m \cdot e^{-j \cdot \omega \tau}}{1 + j \cdot \omega \cdot C_{gs} \cdot R_{gs}} - j \cdot \omega \cdot C_{gd}, \quad (3)$$

$$Y_{22} = 1/R_{ds} + j \cdot \omega \cdot (C_{ds} + C_{gd}), \quad (4)$$

$$\omega = 2\pi f,$$

где g_m – крутизна транзистора; f – частота, на которой измеряются параметры; C_{gs} – паразитная емкость затвор-исток; C_{gd} – паразитная емкость затвор-сток; C_{ds}

– паразитная емкость сток-исток; R_{gs} – паразитное сопротивление затвор-исток; R_{ds} – паразитное сопротивление сток-исток.

В условиях уменьшения длины перекрытия канала стока и истока транзистора и уменьшения паразитного сопротивления, за счет изменений в процессах или материалах, действует следующее условие – пока имеются два проводящих материала, разделенных на входе затвора транзистора, будет образовываться паразитная емкость затвор-исток. Эта емкость шунтирует вход полевого транзистора на высоких частотах и является одной из основных причин, по которым коэффициент усиления устройства падает на высоких частотах [29].

Согласно работам [30–32], для рНЕМТ основными нелинейными параметрами, оказывающими наибольшее влияние на сжатие коэффициента передачи, являются нелинейности крутизны зависимого источника (g_m) и выходной проводимости (G_0).

В УРУ ячейки усиления расположены не последовательно, как в классических каскадных усилителях, а параллельно. Параллельные ячейки усиления размещены вдоль двух линий передачи (см. рис. 1).

Входы ячеек подключаются к входной линии передачи, выходы, соответственно, – к выходной через равные промежутки времени. Сигнал во время прохождения по входной линии передачи слева направо последовательно возбуждает каждую ячейку усиления и рассеивается в правом согласующем резисторе.

Расчет оптимального количества ячеек усиления

$$n = \frac{2 \cdot A}{g_m \cdot Z_0}, \quad (5)$$

где A – коэффициент усиления по напряжению; Z_0 – 50 Ом.

Зная оптимальное количество ячеек усиления, можно провести расчет максимального коэффициента усиления по мощности (6):

$$G_{\max}(\omega) = \frac{g_m^2 \cdot Z_{0d} \cdot Z_{0g} \cdot \left(\sin \left(\frac{n \cdot (A_d(\omega) - A_g(\omega))}{2} \right) \right)^2 \cdot e^{(-n \cdot (A_d(\omega) + A_g(\omega)))}}{4 \cdot \left(1 + \left(\frac{\omega}{\omega_c} \right)^2 \right) \cdot \left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_c} \right)^2 \right) \cdot \left(\sinh \left(\frac{A_d(\omega) - A_g(\omega)}{2} \right) \right)^2}, \quad (6)$$

Результаты предварительного расчета УРУ отображены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты предварительного расчета УРУ

Параметр	Значение	Ед. изм.
Оптимальное число ячеек усиления n	10	–
Максимальный коэффициент усиления по мощности G_{\max} на частоте 20 ГГц	16,07	дБ
Максимальная выходная мощность $P_{\text{вых, max}}$ на частоте 20 ГГц	18,74	дБм

Результаты моделирования

Как было определено в предварительном расчете, 10 ячеек усиления являются актуальным количеством для проектирования УРУ на выбранном арсенид галлиевом транзисторе. Для одиночного транзистора произведение коэффициента усиления на

$$P_{\text{вых}} = \frac{g_m^2 \cdot V_{\text{вх}}^2 \cdot e^{-n(A_g + A_d)} \cdot \sinh^2 \left[\frac{n}{2} \cdot (A_g - A_d) \right]}{\left(1 + \frac{\omega^2}{\omega_g^2} \right) \cdot \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_c^2} \right) \cdot \sinh^2 \left[\frac{1}{2} \cdot (A_g + A_d) \right]}, \quad (7)$$

где g_m – крутизна транзистора; Z_{0d} – характеристическое сопротивление стоковой линии, Ом; Z_{0g} – характеристическое сопротивление затворной линии, Ом; n – количество ячеек усиления; $A_d(\omega)$ – потери в стоковой искусственной линии передачи; $A_g(\omega)$ – потери в затворной искусственной линии передачи; ω – циклическая частота, Гц; ω_c – циклическая частота среза, Гц.

Выходная мощность УРУ с учетом потерь в стоковой и затворной линии передачи рассчитывается по формуле (7) [33].

полосу пропускания в основном фиксировано. При увеличении ширины стока транзистора (периферии транзистора) его коэффициент усиления увеличивается, но полоса пропускания уменьшается из-за роста паразитной емкости.

В УРУ количество ячеек усиления можно увеличивать без ухудшения полосы пропускания. Это связано с тем, что паразитные емкости ячеек усиления

разделены секциями линий передачи, из-за чего происходит рост времени распространения сигнала от входа к выходу. Кроме того, источник и нагрузка подключаются к оконечным линиям передачи, благодаря чему УРУ присуще отличное широкополосное согласование. Из-за потерь в линиях передачи количество ячеек усиления нельзя увеличивать бесконечно.

Модель УРУ на сосредоточенных элементах из 10 ячеек усиления показана на рис. 4.

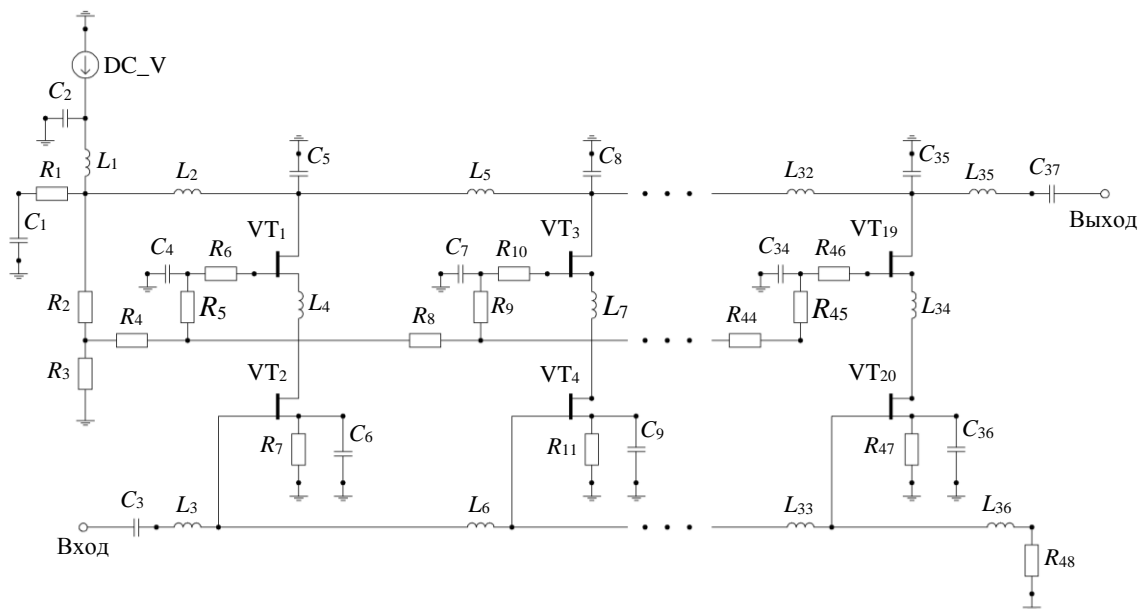


Рис. 4. Принципиальная схема УРУ с 10 ячейками усиления

Результаты моделирования коэффициента передачи, коэффициентов отражения по входу и выходу показаны на рис. 5, а выходной мощности УРУ в точке сжатия на 1 дБ показаны на рис. 6. Моделирование производилось при помощи САПР.

Оценим изменение коэффициента передачи, коэффициентов отражения по входу и выходу, а также выходной мощности в точке сжатия на 1 дБ с исполь-

зованием от 8 до 12 ячеек усиления. Для сравнения параметров УРУ при разном количестве ячеек усиления будем использовать принципиальную схему каскодного усилителя (см. рис. 4).

Рассмотрим результаты моделирования коэффициента передачи с разным количеством ячеек усиления (рис. 7). Моделирование производилось при помощи САПР.

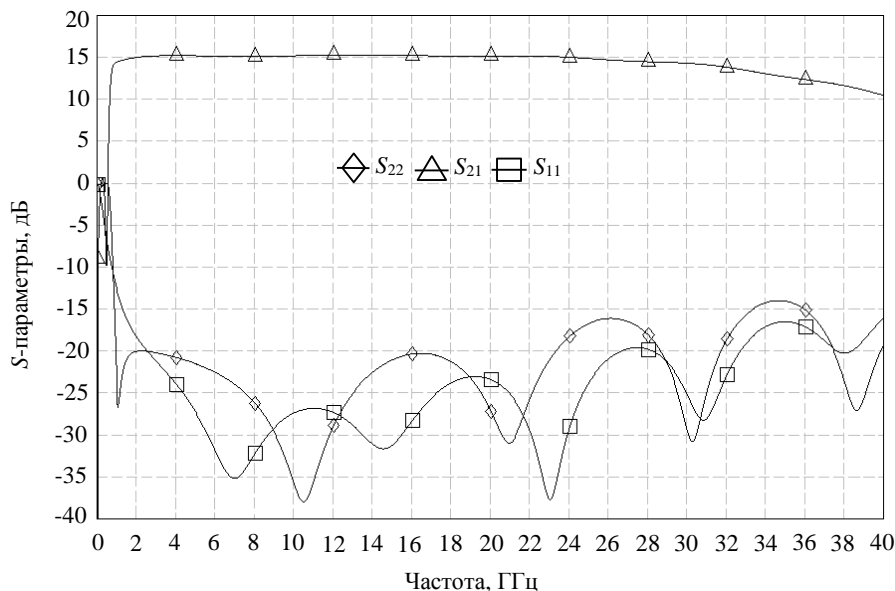


Рис. 5. S-параметры усилителя

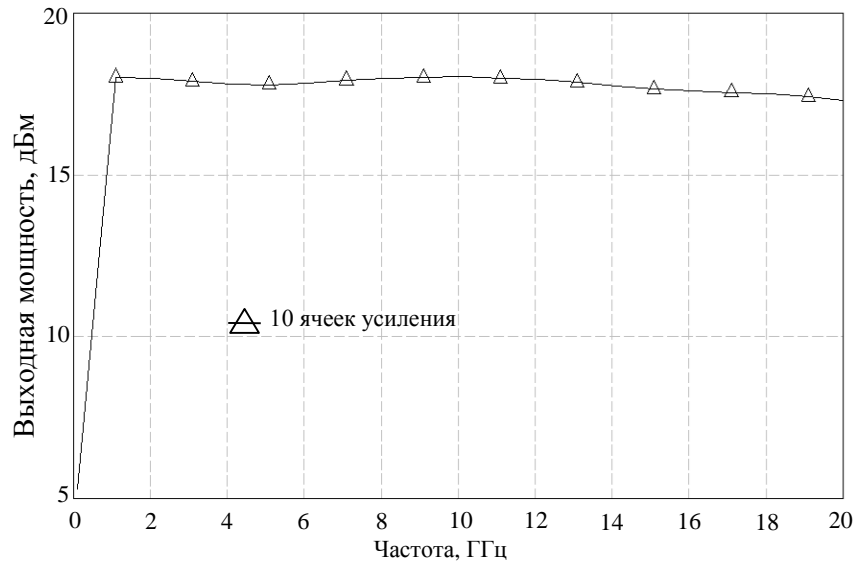
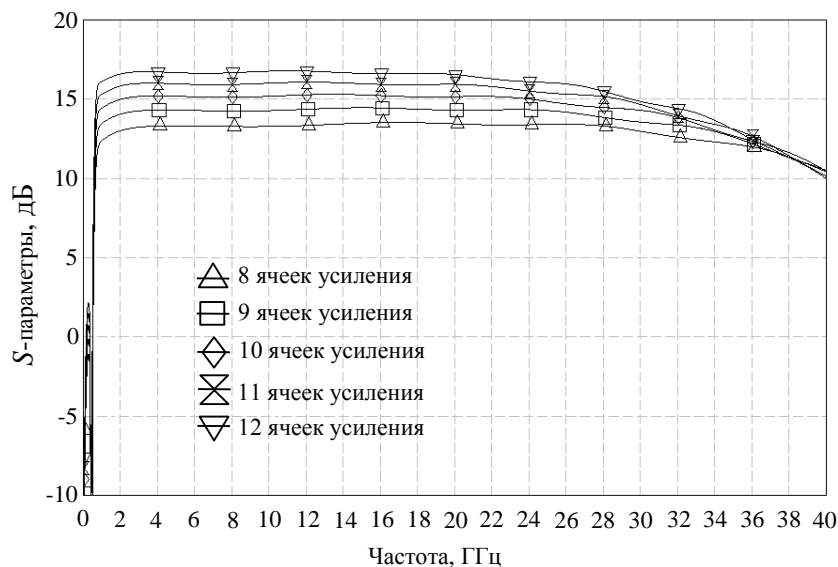


Рис. 6. Выходная мощность в точке сжатия на 1 дБ

Рис. 7. Коэффициент передачи (S_{21}) n ячеек усиления

Исходя из рисунка, видно, что с увеличением количества ячеек усиления происходит рост коэффициента передачи во всем диапазоне рабочих частот. Результаты, полученные на частоте от 2 до 20 ГГц, отображены в табл. 3.

Таблица 3
Результаты моделирования коэффициента передачи в САПР

Количество ячеек усиления	Коэффициент передачи на частоте		Ед. изм.
	2 ГГц	20 ГГц	
8	13	13,44	дБ
9	14,04	14,3	дБ
10	15,01	15,2	дБ
11	15,81	15,93	дБ
12	16,58	16,54	дБ

По полученным данным можно сказать, что увеличение количества ячеек усиления не приводит к значительному увеличению коэффициента передачи, в особенности с использованием 11 и 12 ячеек уси-

ния, где прирост на частоте 20 ГГц составил 0,73 и 0,61 дБ соответственно.

На рис. 8 представлен результат моделирования выходной мощности в точке сжатия на 1 дБ.

Увеличение количества ячеек усиления приводит к росту выходной мощности во всем рабочем диапазоне частот. Стоит отметить, что для случая с использованием 12 ячеек виднеется резкий спад характеристики на частотах от 18 до 20 ГГц. Помимо этого, возрастает неравномерность характеристики. Полученные результаты отображены в табл. 4.

Исходя из результатов, представленных в табл. 3, можно сказать, что увеличение количества ячеек усиления незначительно увеличивает выходную мощность УРУ. Прирост от использования оптимального количества ячеек усиления (10) по сравнению с 11 ячейками составил 0,34 дБм на частоте 2 ГГц и 0,22 дБм на частоте 20 ГГц. Дальнейшее увеличение ячеек усиления не даст ощутимого роста выходной мощности, так как за каждую добавленную ячейку

прирост будет составлять примерно от 0,15 до 0,1 дБм, но приведет к ухудшению коэффициентов

отражения по входу и выходу, ухудшению стабильности, увеличению размера и удорожанию микросхемы.

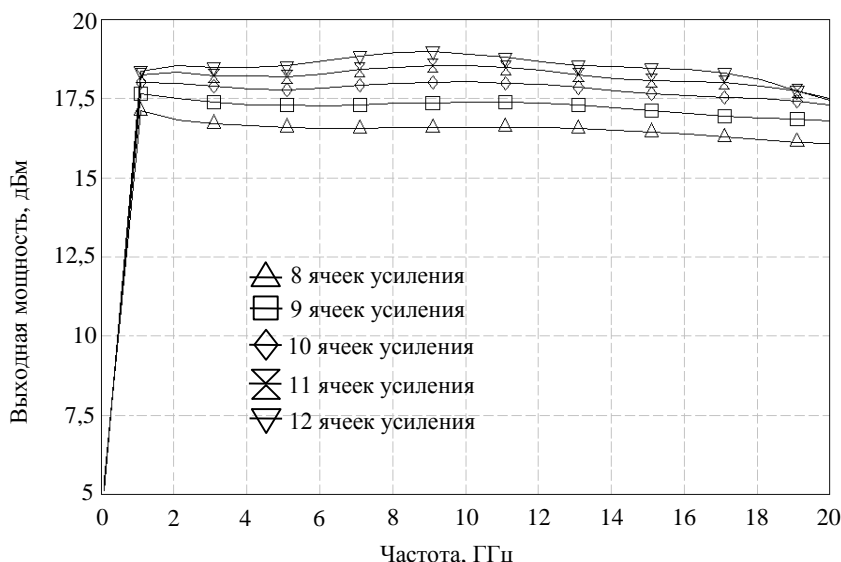


Рис. 8. Выходная мощность в точке сжатия на 1 дБ для n ячеек усиления

Таблица 4

**Результаты моделирования
выходной мощности в САПР**

Количество ячеек усиления	Выходная мощность на частоте		Ед. изм.
	2 ГГц	20 ГГц	
8	16,86	16,07	дБм
9	17,52	16,79	дБм
10	17,98	17,3	дБм
11	18,32	17,2	дБм
12	18,52	17,2	дБм

Заключение

В настоящей работе было проведено исследование усилителя распределенного усиления на основе GaAs полевых транзисторов. В ходе работы были оценены основные параметры транзистора GaAs pHEMT025D, был произведен расчет оптимального количества ячеек усиления, а также расчет каскадного усилителя распределенного усиления, получена его принципиальная схема, работающая в диапазоне от 2 до 20 ГГц. По результатам работы можно отметить следующее:

- Использование 10 ячеек усиления для транзистора GaAs pHEMT025D является оптимальным.
- Дальнейшее увеличение числа ячеек не приводит к увеличению коэффициента передачи и уровня выходной мощности. Превышение оптимального количества приводит к снижению уровня выходной мощности на верхних частотах. Результаты исследования будут полезны при проектировании усилителей распределенного усиления в монолитно-интегральном исполнении.
- Полученные характеристики усилителя распределенного усиления с использованием оптимального количества ячеек усиления (10) полностью соответствуют аналогам на рынке.

Работа выполнена с использованием библиотеки проектирования, предоставленной АО «Светлана-Рост» для научно-образовательных целей.

Литература

1. Схемотехника аналоговых электронных устройств [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://wm-help.net/lib/b/book/1865579333/52>, свободный (дата обращения: 04.04.2023).
2. Husna Hamza K. A review of GaN HEMT broadband power amplifiers / K. Husna Hamza, D. Nirmal // International Journal of Electronics and Communications. – 2020. – Vol. 2, No. 116. – P. 1–11.
3. Ginzton E.L. Distributed Amplification / E.L. Ginzton, W.R. Hewlett, J.H. Jasberg, J.D. Noe // Proceedings of the IRE. – 1948. – Vol. 8, No. 36. – P. 956–969.
4. Arbabian A. A Broadband Distributed Amplifier with Internal Feedback Providing 660 GHz GBW in 90 nm CMOS / A. Arbabian, A.M. Nikejad // IEEE International Solid-State Circuits Conference. – 2008. – P. 196–197.
5. Tsai M.-D. A 70 GHz Cascaded Multi-Stage Distributed Amplifier in 90 nm CMOS Technology / M.-D. Tsai, H. Wang, J.-F. Kuan, C.-S. Chang // IEEE International Solid-State Circuits Conference. – 2008. – P. 402–403.
6. Chien L. 40-Gb/s High-Gain Distributed Amplifiers with Cascaded Gain Stages in 0.18- μ m CMOS / L. Chien, L. Lu // IEEE Journal of Solid-State Circuits. – 2007. – Vol. 42, No. 12. – P. 2715–2725.
7. Jahanian A. A CMOS Distributed Amplifier with Distributed Active Input Balun Using GBW and Linearity Enhancing Techniques / A. Jahanian, P. Heydari // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2012. – Vol. 60, No. 5. – P. 1331–1341.
8. Poluchart J. A 4–91-GHz Traveling-Wave Amplifier in a Standard 0.12- μ m SOI CMOS Microprocessor Technology // IEEE Journal of Solid-State Circuits. – 2004. – Vol. 39, No. 9. – P. 1445–1461.
9. Kim J. A 92 GHz Bandwidth Distributed Amplifier in a 45 nm SOI CMOS Technology / J. Kim, J.F. Buckwalter // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. – 2011. – Vol. 21, No. 6. – P. 329–331.
10. Liu R. An 80 GHz Travelling-Wave Amplifier in a 90 nm CMOS Technology / R. Liu, T. Wang, L. Lu, H. Wang, S. Wang, C. Chao // IEEE International Solid-State Circuits Conference. – 2005. – P. 154–155.

11. Arbabian A. Design of a CMOS Tapered Cascaded Multistage Distributed Amplifier / A. Arbabian, A.M. Niknejad // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2009. – Vol. 57, No. 4. – P. 938–947.
12. Yazdi A. A 1.8 V Three-Stage 25 GHz 3 dB-BW Differential Non-Uniform Downsized Distributed Amplifier / A. Yazdi, D. Lin, P. Heydari // IEEE International Solid-State Circuits Conference. – 2005. – P. 156–157.
13. Fang K. Supply-Scaling for Efficiency Enhancement in Distributed Power Amplifiers / K. Fang, C.S. Levy, J.F. Buckwalter // IEEE Journal of Solid-State Circuits. – 2016. – Vol. 51, No. 9. – P. 1994–2005.
14. Afshari E. Electrical Funnel: A Broadband Signal Combining Method / E. Afshari, H. Bhat, A. Hajimini // IEEE International Solid-State Circuits Conference. – 2006. – P. 751–760.
15. Chen J. Design and Analysis of a Stage-Scaled Distributed Power Amplifier / J. Chen, A.M. Niknejad // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2011. – Vol. 59, No. 5. – P. 1274–1283.
16. Zhang Y. A 2–22 GHz CMOS Distributed Power Amplifier with Combined Artificial Transmission Lines / Y. Zhang, K. Ma // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. – 2017. – Vol. 27, No. 12. – P. 1122–1124.
17. Gao L. A 1–17 GHz Stacked Distributed Power Amplifier with 19–21 dBm Saturated Output Power in 45 nm CMOS SOI Technology / L. Gao, Q. Ma, G.M. Rebeiz // IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. – 2018. – P. 454–456.
18. Tarar M.M. Design and Implementation of Wideband Stacked Distributed Power Amplifier in 0.13- μ m CMOS Using Uniform Distributed Topology / M.M. Tarar, R. Negra // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2017. – Vol. 65, No. 12. – P. 5212–5222.
19. Fang K. Efficient Linear Millimeter-Wave Distributed Transceivers in CMOS SOI / K. Fang, J.F. Buckwalter // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2019. – Vol. 67, No. 1. – P. 295–307.
20. Kobayashi K.W. A Novel 100 MHz–45 GHz Input-Termination-Less Distributed Amplifier Design with Low-Frequency Low-Noise and High Linearity Implemented with a 6 Inch 0.15 μ m GaN-SiC Wafer Process Technology / K.W. Kobayashi, D. Denninghoff, D. Miller // IEEE Journal of Solid-State Circuits. – 2016. – Vol. 51, No. 9. – P. 2017–2026.
21. Heydari P. Design and Analysis of a Performance-Optimized CMOS UWB Distributed LNA // IEEE Journal of Solid-State Circuits. – 2007. – Vol. 42, No. 9. – P. 1892–1905.
22. Distributed Amplification in CMOS [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.mos6581.org/files/Brecht_Machiels_Distributed_Amplification_in_CMOS.pdf, свободный (дата обращения: 15.05.2023).
23. Campbell C.A. Wideband Power Amplifier MMIC Utilizing GaN on SiC HEMT Technology // IEEE Journal of Solid-State Circuits. – 2009. – Vol. 44, No. 10. – P. 2640–2647.
24. Banyamin B. The Gain Advantages of Four Cascaded Single Stage Distributed Amplifier Configurations / B. Banyamin, M. Berwick // IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. – 2000. – P. 1325–1328.
25. Chirala M.K. Design of an Ultra-Small Distributed Low-Noise-Amplifier for Ultra-Wideband Applications / M.K. Chirala, C. Huynh, C. Nguyen, X. Guan // IEEE Proceedings of APSURSI. – 2011. – P. 3361–3364.
26. Banyamin B.Y. Analysis of the Performance of Four-Cascaded Single-Stage Distributed Amplifiers / B.Y. Banyamin, M. Berwick // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2000. – P. 2657–2663.
27. Гоголев Н.И. Усилители с распределенным усилением / Н.И. Гоголев, А. Салих, Д.С. Брагин, В.Д. Дмитриев //

Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем (МЭС). – 2022. – Вып. 4. – С. 155–162.

28. Grebennikov A. Distributed Power Amplifiers for RF and Microwave Communications / A. Grebennikov, N. Kumar. – Artech, 2015. – 439 p.
29. Broadband Microwave Amplifiers in Deep Submicron CMOS-Technology [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://macsphere.mcmaster.ca/bitstream/11375/13084/1/fulltext.pdf>, свободный (дата обращения: 29.05.2023).
30. Beibei Wang. Advances in Cognitive Radio Networks: A survey / Beibei Wang, K.J. Ray Liu // IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing. – 2011. – Vol. 5, No. 1. – P. 5–23.
31. Дмитриев В. Оценка параметров pHEMT-СВЧ-полевого транзистора по нелинейным критериям / В. Дмитриев, В. Коротаев, Д. Шишкин. – Доклады ТУСУР. – 2011. – Т. 24, вып. 2. – С. 46–50.
32. Алексеев О.В. Усилители мощности с распределенным усилением. – Л.: Энергия, 1968. – 221 с.
33. A 70-GHz Bandwidth and 9-dB Gain Travelling Wave Amplifier Using 0.15- μ m Gate InGaP/InGaAs HEMTs with Coplanar Transmission Line Technology [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/224691658_A_70GHz_Bandwidth_and_9dB_Gain_Travelling_Wave_Amplifier_Using_015mm_Gate_In-GaP/InGaAs_HEMTs_with_Coplanar_Transmission_Line_Technology, свободный (дата обращения: 9.06.2023).

Гоголев Никита Игоревич

Аспирант каф. сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники (СВЧКР) Томского государственного ун-та систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 70-15-15
Эл. почта: gni@fb.tusur.ru

Салих Аятулла

Аспирант каф. телекоммуникаций и основ радиотехники (ТОР) ТУСУРа Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 70-15-15
Эл. почта: sak@csp.tusur.ru

Брагин Дмитрий Сергеевич

Ст. преп. каф. ТОР ТУСУРа Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 70-15-29
Эл. почта: bds@csp.tusur.ru

Дмитриев Владимир Дмитриевич

Канд. техн. наук, доцент каф. ТОР ТУСУРа Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 41-33-98
Эл. почта: dvd51@mail.ru

Gogolev N.I., Salikh A., Bragin D.S., Dmitriev V.D.
Study of the characteristics of a distributed gain amplifier based on GaAs field-effect transistors

The distributed amplifier is an effective solution for creating broadband amplifiers in wireless communication, pulse and measurement technology. In this study, a distributed amplification amplifier based on GaAs field-effect transistors was deve-

loped. The optimal number of amplification cells was determined and a cascaded distributed amplification amplifier with a schematic diagram operating in the range of 2 to 20 GHz was designed. Preliminary calculations of the main characteristics of the amplifier were also performed, and based on them, a model of the distributed amplification amplifier was constructed, which was simulated in CAD. The changes in the gain and output power when compressed by 1 dB depending on the number of amplification cells were analyzed. The results of the study can be used in designing distributed amplification amplifiers for various systems in modern radio electronics.

Keywords: gallium arsenide (GaAs), HEMT, cascode, DA, wideband.

DOI: 10.21293/1818-0442-2023-26-3-32-40

References

1. *Skhemitekhnika analogovykh elektronnykh ustrojstv* [Analog Electronics Circuit Design]. Available at: <https://wm-help.net/lib/b/book/1865579333/52>, free (Accessed: April 04, 2023) (in Russ.).
2. Husna Hamza K., Nirmal D. A review of GaN HEMT broadband power amplifiers. *International Journal of Electronics and Communications*, 2020, vol. 2, no. 116, pp. 1–11.
3. Ginzton E.L., Hewlett W.R., Jasberg J.H., Noe J.D. Distributed Amplification. *Proceedings of the IRE*, 1948, vol. 8, no. 36, pp. 956–969.
4. Arbabian A., Nikejad A.M. A Broadband Distributed Amplifier with Internal Feedback Providing 660 GHz GBW in 90 nm CMOS. *IEEE International Solid-State Circuits Conference*, 2008, pp. 196–197.
5. Tsai M.-D., Wang H., Kuan J.-F., Chang C.-S. A 70 GHz Cascaded Multi-Stage Distributed Amplifier in 90 nm CMOS Technology. *International Solid-State Circuits Conference*, 2008, pp. 402–403.
6. Chien L., Lu L. 40-Gb/s High-Gain Distributed Amplifiers with Cascaded Gain Stages in 0.18- μm CMOS. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2007, vol. 42, no. 12, pp. 2715–2725.
7. Jahanian A., Heydari P. A CMOS Distributed Amplifier with Distributed Active Input Balun Using GBW and Linearity Enhancing Techniques. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2012, vol. 60, no. 5, pp. 1331–1341.
8. Poluchart J. A 4–91-GHz Traveling-Wave Amplifier in a Standard 0.12- μm SOI CMOS Microprocessor Technology. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2004, vol. 39, no. 9, pp. 1445–1461.
9. Kim J., Buckwalter J.F. A 92 GHz Bandwidth Distributed Amplifier in a 45 nm SOI CMOS Technology. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2011, vol. 21, no. 6, pp. 329–331.
10. Liu R., Wang T., Lu L., Wang H., Wang S., Chao C. An 80 GHz Travelling-Wave Amplifier in a 90 nm CMOS Technology. *IEEE International Solid-State Circuits Conference*, 2005, pp. 154–155.
11. Arbabian A., Nikejad A.M. Design of a CMOS Tapered Cascaded Multistage Distributed Amplifier. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2009, vol. 57, no. 4, pp. 938–947.
12. Yazdi A., Lin D., Heydari P. A 1.8 V Three-Stage 25 GHz 3 dB-BW Differential Non-Uniform Downsized Distributed Amplifier. *IEEE International Solid-State Circuits Conference*, 2005, pp. 156–157.
13. Fang K., Levy C.S., Buckwalter J.F. Supply-Scaling for Efficiency Enhancement in Distributed Power Amplifiers. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2016, vol. 51, no. 9, pp. 1994–2005.
14. Afshari E., Bhat H., Hajimimi A. Electrical Funnel: A Broadband Signal Combining Method. *IEEE International Solid-State Circuits Conference*, 2006, pp. 751–760.
15. Chen J., Niknejad A.M. Design and Analysis of a Stage-Scaled Distributed Power Amplifier. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2011, vol. 59, no. 5, pp. 1274–1283.
16. Zhang Y., Ma K. A 2–22 GHz CMOS Distributed Power Amplifier with Combined Artificial Transmission Lines. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2017, vol. 27, no. 12, pp. 1122–1124.
17. Gao L., Ma Q., Rebeiz G.M. A 1–17 GHz Stacked Distributed Power Amplifier with 19–21 dBm Saturated Output Power in 45 nm CMOS SOI Technology. *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, 2018, pp. 454–456.
18. Tarar M.M., Negra R. Design and Implementation of Wideband Stacked Distributed Power Amplifier in 0.13- μm CMOS Using Uniform Distributed Topology. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2017, vol. 65, no. 12, pp. 5212–5222.
19. Fang K., Buckwalter J.F. Efficient Linear Millimeter-Wave Distributed Transceivers in CMOS SOI. *Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2019, vol. 67, no. 1, pp. 295–307.
20. Kobayashi K.W., Denninghoff D., Miller D. A Novel 100 MHz–45 GHz Input-Termination-Less Distributed Amplifier Design with Low-Frequency Low-Noise and High Linearity Implemented with A 6 Inch 0.15 μm GaN-SiC Wafer Process Technology. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2016, vol. 51, no. 9, pp. 2017–2026.
21. Heydari P. Design and Analysis of a Performance-Optimized CMOS UWB Distributed LNA. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2007, vol. 42, no. 9, pp. 1892–1905.
22. Distributed Amplification in CMOS. Available at: https://www.mos6581.org/files/Brecht_Machiels_Distributed_Amplification_in_CMOS.pdf, free. (Accessed: May 15, 2023).
23. Campbell C.A. Wideband Power Amplifier MMIC Utilizing GaN on SiC HEMT Technology. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2009, vol. 44, no. 10, pp. 2640–2647.
24. Banyamin B., Berwick M. The Gain Advantages of Four Cascaded Single Stage Distributed Amplifier Configurations. *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, 2000, pp. 1325–1328.
25. Chirala M.K., Huynh C., Nguyen C., Guan X. Design of an Ultra-Small Distributed Low-Noise-Amplifier for Ultra-Wideband Applications. *IEEE Proceedings of APSURSI*, 2011, pp. 3361–3364.
26. Banyamin B.Y., Berwick M. Analysis of the Performance of Four-Cascaded Single-Stage Distributed Amplifiers. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2000, pp. 2657–2663.
27. Gogolev N.I., Salih A., Bragin D.S., Dmitriev V.D. *Usiliteli s raspredelennym usileniem* [Distributed Gain Amplifiers]. *Problems of Advanced Micro- and Nanoelectronic Systems Development (MES)*, 2022, no. 4, pp. 155–162. (In Russ.).
28. Grebennikov A., Kumar N. Distributed Power Amplifiers for RF and Microwave Communications. Artech, 2015, 439 p.
29. Broadband Microwave Amplifiers in Deep Submicron CMOS Technology. Available at: <https://macsphere.mcmaster.ca/bitstream/11375/13084/1/fulltext.pdf>, free (Accessed: May 29, 2023).
30. Beibei Wang, Liu K.J.R. Advances in Cognitive Radio Networks: Asurvey. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2011, vol. 5, no. 1, pp. 5–23.

31. Dmitriev V., Korotaev V., Shishkin D. *Ocenka Parametrov pHEMT SVCH Polevogo Tranzistora po Nelinejnym Kriteriyam* [Evaluation of pHEMT Microwave Field Effect Transistor Parameters by Nonlinear Criteria]. *Proceedings of TUSUR University*, 2011, vol. 24, no. 2, pp. 46–50 (in Russ.).

32. Alekseev O.V. *Usiliteli moshchnosti s raspredelenym usileniem* [Distributed power amplifier]. Leningrad, Energiya Publ., 1968. 221 p. (in Russ.).

33. A 70-GHz Bandwidth and 9-dB Gain Travelling Wave Amplifier Using 0.15- μ m Gate InGaP/InGaAs HEMTs with Coplanar Transmission Line Technology. Available at: https://www.researchgate.net/publication/224691658_A_70GHz_Bandwidth_and_9dB_Gain_Travelling_Wave_Amplifier_Using_015mm_Gate_InGaPInGaAs_HEMTs_with_Coplanar_Transmission_Line_Technology, free (Accessed: June 9, 2023).

Nikita I. Gogolev

Postgraduate student, Department of Microwave and Quantum Radio Engineering, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 70-15-15
Email: gni@fb.tusur.ru

Ayatulla Salikh

Postgraduate student, Department of Telecommunications and Basic Principles of Radio Engineering, TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 70-15-15
Email: sak@csp.tusur.ru

Dmitry S. Bragin

Senior Lecturer, Department of Telecommunications and Basic Principles of Radio Engineering, TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0002-0875-3301
Phone: +7 (382-2) 70-15-29
Email: bds@csp.tusur.ru

Vladimir D. Dmitriev

Candidate of Sciences in Engineering, Assistant Professor at the Department of Telecommunications and Basic Principles of Radio Engineering, TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 41-33-98
Email: dvd51@mail.ru

УДК 681.786.2

А.А. Тисленко

Повышение точности построения карт глубин пространства в активно-импульсной телевизионной измерительной системе с использованием цифровой фильтрации изображений

В качестве устройств определения дальности до объектов интереса (ОИ) может быть использована активно-импульсная телевизионная система (АИ ТИС). Применение АИ ТИС распространяется в сфере навигации транспортных средств, а также в области задач по обнаружению объектов при недостаточности естественного освещения и в условиях малопрозрачных сред. Работа посвящена исследованию повышения точности построения карт глубин пространства в АИ ТИС, построенной на базе электронно-оптического преобразователя (ЭОП), при обработке выходных изображений системы фильтром Гаусса, медианным фильтром и 3D-фильтром. Выполнены: сравнительная оценка качества получаемых изображений и оценка измерения дальности. Показано, что применение фильтрации Гаусса обеспечивает одну из самых высоких эффективностей подавления шума на изображениях, получаемых данной системой, и тем самым позволяет строить карты глубин пространства с наивысшей точностью при использовании результата нахождения измерительной функции по методу аппроксимации. К достигнутым параметрам рассматриваемой системы можно отнести точность построения карт глубин по дальности до 4,5 см.

Ключевые слова: фильтрация, электронно-оптический преобразователь, шумовая составляющая, отношение сигнал/шум, измерение дальности.

DOI: 10.21293/1818-0442-2023-26-3-41-48

Решение задач определения дальности до объектов интереса (ОИ) требует высокого качества выходных изображений, получаемых с использованием АИ ТИС. Снижение качества выходных изображений обусловлено следующими факторами:

- 1) стационарная компонента шума ЭОП;
- 2) шум КМОП-матрицы (матрицы, построенной на базе CMOS-технологии);
- 3) шум квантования АЦП;
- 4) нестационарная компонента шума ЭОП;
- 5) неравномерная чувствительность КМОП-матрицы;
- 6) спекл-шум;
- 7) наличие повреждённых элементов КМОП-матрицы или групп элементов, имеющих аномальную чувствительность;
- 8) сцинтилляция (кратковременные вспышки на экране ЭОП).

Таким образом, величина яркости выходных изображений содержит полезную составляющую сигнала, аддитивную, мультипликативную и аппликативную составляющие [1, 2]. В связи с этим в данной работе исследуется эффективность применения методов пространственной и гомоморфной фильтрации к изображениям, полученным с использованием АИ ТИС, построенной на базе ЭОП, для обеспечения эффективного шумоподавления аддитивной и мультипликативной составляющих. Целью данной работы является оценка качества получаемых изображений и оценка точности построения карт глубин пространства по выходным кадрам АИ ТИС, обработанным фильтрами Гаусса, медианным и 3D-фильтром.

Решение проблемы подавления сложной шумовой составляющей рассматривается в отечественных работах. В работе [3] для решения данной проблемы предложен алгоритм расширения динамического

диапазона уровней яркости. В [4] описывается простейший метод обработки изображений – усреднение нескольких десятков кадров одной и той же сцены, и в [5] оценивается точность построения карт глубин. Работы [6, 7] посвящены применению сверточной искусственной нейронной сети шумоподавления и алгоритмов инверсной фильтрации соответственно. В работах зарубежных авторов, в частности [8], выполнено сравнение различных видов билатеральных фильтров при обработке изображения, полученного твердотельным лидаром.

Описание АИ ТИС

Принцип работы АИ ТИС основывается на импульсном подсвете пространства и стробировании по времени фотоприёмного устройства, оснащенного быстродействующим затвором.

Используемые в данной работе данные были получены с использованием АИ ТИС, структурная схема которой приведена на рис. 1 [9].

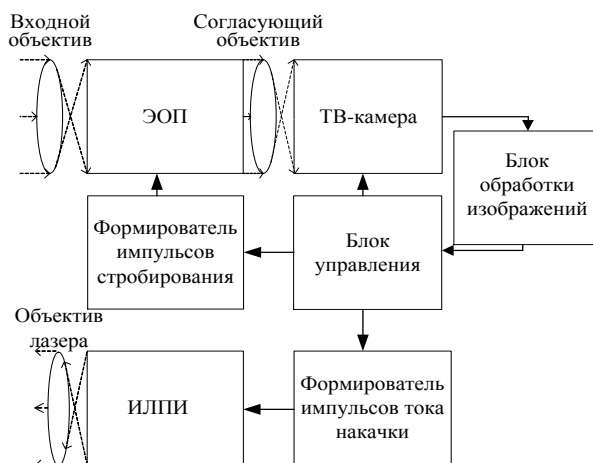


Рис. 1. Структурная схема АИ ТИС

Структурную схему АИ ТИС можно условно разделить на три модуля: лазерный излучающий модуль, приёмный модуль фотоприёмника, модуль управления и обработки изображений.

Формирование светового импульса обеспечивается в лазерном излучающем модуле путём подачи управляющего сигнала на формирователь импульсов тока накачки, где формируются импульсы подсвета пространства (ИПП) с заданными параметрами. Сформированный сигнал с выхода формирователя импульсов тока накачки поступает на импульсный лазерный полупроводниковый излучатель (ИЛПИ), импульсная мощность которого равна 320 Вт, где непосредственно формируется световой поток ИК-диапазона длин волн. Сформированный световой поток после прохождения через объектив излучателя распространяется в пространстве и, попадая на ОИ, отражается от него, образуя отражённый световой поток.

Регистрация отражённого светового потока осуществляется при открытом затворе ЭОПа, открытие которого производится поступившим управляющим сигналом с блока управления. Продолжительность времени открытого состояния затвора называется длительностью импульса стробирования фотоприёмника (ИСФ). Время от начала излучения и до момента открытия затвора называется задержкой стробирования. ЭОП преобразует поступающий световой поток ИК-диапазона в видимое излучение и усиливает его интенсивность. После прохождения ЭОПа поток фотоэлектронов через согласующий объектив фокусируется на КМОП-матрицу, которая обеспечивает формирование конечного изображения.

Описанный принцип работы ТИС, работающей в АИ-режиме, представляет реализацию метода стробирования по дальности. Это означает, что импульсы света, излучаемые системой, отражаются от ОИ и регистрируются АИ ТИС в заданные промежутки времени. Длительность распространения излучаемых импульсов света ограничена длительностью ИПП, а время, за которое отражённый световой поток будет регистрироваться системой, ограничивается длительностью ИСФ. Длительности ИПП и ИСФ, а также величина задержки стробирования определяют просматриваемую (подсвечиваемую) часть пространства – активную зону видения (АЗВ). На рис. 2 представлены диаграммы сигналов ИПП и ИСФ при равных длительностях; на рис. 3 – длительность ИПП меньше, чем длительность ИСФ, и диаграммы АЗВ соответственно.

Рисунки 2 и 3 иллюстрируют, что форма и протяжённость АЗВ (l_z) пространства определяется длительностями ИПП и ИСФ, а также их соотношением.

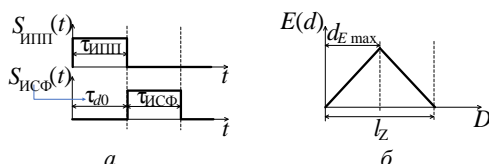


Рис. 2. Диаграммы сигналов при равных длительностях ИПП и ИСФ: а – ИПП и ИСФ; б – АЗВ

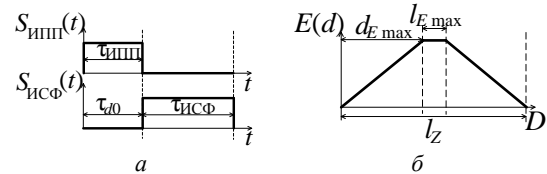


Рис. 3. Диаграммы сигналов при разных длительностях ИПП и ИСФ: а – ИПП и ИСФ, б – АЗВ

Величиной $d_{E \max}$ обозначается дальность до точки пространства, содержащей потенциальный ОИ, с максимальной интенсивностью отражаемого света. Вычисляется как

$$d_{E \max} = \frac{\tau_{d0} \cdot c}{2},$$

где τ_{d0} – начальная задержка стробирования; c – скорость света.

При разных длительностях ИПП и ИСФ величина $l_{E \max}$ характеризует протяжённость части пространства с максимальной интенсивностью отражаемого света от потенциально находящегося в этой части пространства ОИ. В случае когда длительность ИСФ больше, чем длительность ИПП, величина $l_{E \max}$ вычисляется как

$$l_{E \max} = \frac{(\tau_{ИСФ} - \tau_{ИПП}) \cdot c}{2},$$

где $\tau_{ИПП}$ – длительность ИПП; $\tau_{ИСФ}$ – длительность ИСФ.

Методы измерения дальности АИ ТИС условно разделяются по количеству используемых АЗВ. В данной работе используется многозонный метод измерения дальности (ММИД) [10], заключающийся в формировании двух групп кадров: с первой АЗВ и с суммарной АЗВ.

Яркость пикселя кадра с первой АЗВ аналитически описывается следующим образом:

$$I_1(x, y) = I(x, y, \tau_{d0}) \cdot N,$$

где $I(x, y, \tau_{d0})$ – яркость пикселя с координатами (x, y) с АЗВ, сформированной при задержке стробирования τ_{d0} ; N – количество локальных АЗВ в группе кадров.

Из выражения яркости пикселя кадра с первой АЗВ видно, что каждый кадр состоит из суммы N локальных АЗВ, т.е. его формирование обеспечивается накоплением в КМОП-матрице совокупностей множеств фотонов, относящихся к каждой АЗВ, за время экспозиции одного кадра. Таким образом, обеспечивается искусственное увеличение интенсивности регистрируемого светового потока в кадре.

Яркость пикселя кадра с суммарной АЗВ аналитически описывается следующим образом:

$$I_2(x, y) = \frac{N}{M} \cdot \sum_{m=1}^M I[x, y, (\tau_{d0} + (m-1) \cdot \Delta\tau_d)],$$

где $\Delta\tau_d$ – шаг задержки стробирования; M – количество различных задержек стробирования.

Отличие двух групп кадров состоит в том, что кадры с суммарной АЗВ формируются из нескольких совокупностей локальных АЗВ, которые смещены в пространстве относительно друг друга на некоторый дискретный шаг по дальности, пропорциональный $\Delta\tau_d$.

При нормировании кадра с суммарной АЗВ относительно кадра с первой АЗВ вычисляется кадр отношения. Он представляет собой массив значений, каждый элемент которого содержит число от нуля до единицы, т.е. данный массив содержит значения относительной яркости (ОЯ). Значения ОЯ являются аргументами измерительной функции, которая используется для пересчета измеренной ОЯ в оценку дальности.

Описание фильтрации и принципа построения карт глубин

В этой работе к выходным кадрам обоих типов, полученным по ММИД, применяются фильтр Гаусса со среднеквадратичным отклонением равным 7, медианный фильтр, размерность апертуры которого равна 1×7 , и 3D-фильтр, параметр сигма (величина дисперсии билатерального фильтра) которого равен 25. Применение фильтра размытия Гаусса и медианного фильтра общеизвестно [11]. 3D-фильтр основан на гомоморфной фильтрации в совокупности со стохастическим подходом, его описание дано в [12].

Карта глубины пространства, в сущности, является всё тем же изображением сцены, где каждому пикселю вместо значения яркости присваивается значение дальности до соответствующей области отображаемого пространства. Для удобства восприятия карты глубины по дальности часто используют цветовую палитру.

Таким образом, текущие оценки дальности до некоторой области на поверхности ОИ формируются в АИ ТИС на основе предварительно известной измерительной функции.

Аналитический вид функции измерения неизвестен. Реально в качестве неё выступает калибровочная функция. Она может быть получена применением аппроксимации к вычисленной, при нормировании кадров, совокупности значений ОЯ ОИ, расположенных на различных известных дальностях от системы. Здесь необходимо отметить, что совокупность значений ОЯ для отдельных областей ОИ, расположенных на различных дальностях от системы, вычисляется путём усреднения значений ОЯ в некоторой области ОИ. Усреднение значений ОЯ позволяет уменьшить влияние флуктуаций сигнала яркости (от пикселя к пикселю) и получить более точную оценку калибровочной функции.

Таким образом, входными данными для выполнения калибровки являются усреднённые значения ОЯ ОИ. При этом каждому элементу множества значений ОЯ соответствует величина эталонной дальности до известной области на его поверхности. В качестве критерия аппроксимации используется среднеквадратичный критерий. Для сглаживания используется полином 5-й степени [13–15].

При подстановке в калибровочную (измерительную) функцию текущих значений ОЯ вычисляются оценки дальности до соответствующих областей на поверхности ОИ. При подстановке значений ОЯ каждого пикселя кадра отношения формируется изображение. При этом яркость каждого пикселя содержит

информацию о дальности до отображаемой области на поверхности ОИ.

Описание методики оценок ОСШ, абсолютной ошибки (АО) и времени обработки

Для оценивания качества обработанных изображений используется эталонная оценка ОСШ [16], для которой в качестве эталонных изображений используются усреднённые (по 300 отдельным кадрам) изображения, причём ОСШ оценивается не по всему изображению, а лишь по области ОИ. Выражение, по которому производится вычисление ОСШ,

$$\text{ОСШ} = 20 * \log(M / \sigma), \quad (1)$$

где M – математическое ожидание выборки значений яркости пикселей по области ОИ; σ – среднеквадратичное отклонение (СКО) по яркости.

Выражение для определения σ имеет следующий вид:

$$\sigma = \sqrt{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (I(i, j) - K(i, j))^2} / mn, \quad (2)$$

где $I(i, j)$ – яркость текущего пикселя изображения; $K(i, j)$ – яркость соответствующего пикселя эталонного изображения; m, n – линейные размеры фрагмента изображения.

Для оценки ошибки между полученными значениями дальности по аппроксимирующей функции D_h и эталонными (известными) значениями дальности h измеряемого диапазона вычисляются АО для каждого отсчёта измеряемого диапазона:

$$\text{АО}_h = h - D_h. \quad (3)$$

В качестве интегральной оценки точности построения карт глубин используется критерий среднеквадратичной ошибки (СКО). Выражение, по которому вычисляется СКО,

$$\text{СКО} = \sqrt{\sum_{h=1}^H (\text{АО}_h)^2} / H, \quad (4)$$

где H – количество значений диапазона измеряемой дальности.

При обработке различными фильтрами кадров каждой группы вычислялось время обработки каждого кадра. Среднее время обработки вычислялось как среднее арифметическое всех полученных значений времени обработки для каждого кадра каждого типа.

Результаты обработки

Исходные изображения для обработки были получены путём проведения эксперимента с использованием АИ ТИС, по ММИД, при выбранных в результате теоретического моделирования значениях параметров: длительность импульса подсвета – 30 нс, длительность импульса стробирования фотоприёмника – 130 нс, начальная величина задержки стробирования – 60 нс, шаг задержки стробирования – 6 нс, количество используемых АЗВ равно 20. Описание проведения эксперимента: в узком длинном пространстве (коридоре) расположен ОИ (транспарант с белым листом бумаги на деревянном штативе), изображение которого фиксировалось в режиме видео-

записи АИ ТИС. Штатив с транспарантом по мере увеличения измеряемой дальности смещается вглубь сцены, всё дальше отдаляясь от АИ ТИС. Измеряемым диапазоном дальности является участок пространства от 8 до 20 м, транспарант смещается с шагом 1 м.

Необработанные, обработанные и усреднённые изображения визуально мало отличаются друг от друга. Поэтому для демонстрации изменений была взята выборка яркости по строке, расположенной на середине ОИ (показана пунктирной линией на рис. 4).

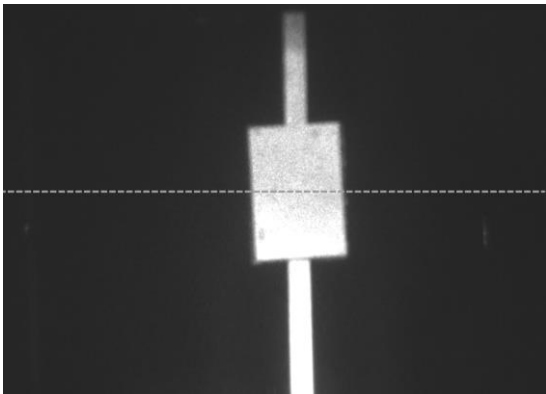


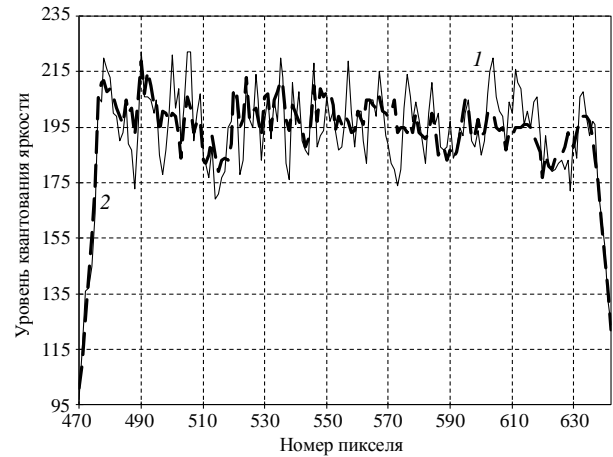
Рис. 4. Пример получаемого изображения (пунктиром показана строка, по данным из которой производится построение графиков зависимости значений яркости от номера пикселя в строке)

На рис. 5, *а* представлены графики зависимостей значений яркости пикселей от номера столбца (распределение яркости по строкам) для необработанных и усреднённых изображений, на рис. 5, *б* – для обработанных различными фильтрами. При этом взята не вся строка, а лишь её часть, отражающая яркость ОИ.

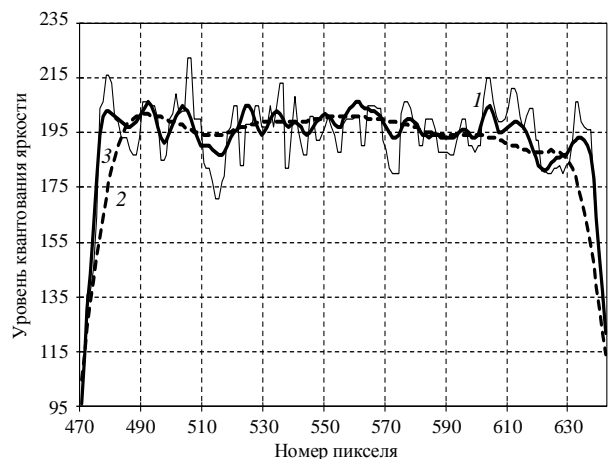
Из графиков зависимостей, приведённых на рис. 5, *а*, видно, что характер поведения графиков зависимости для усреднённых кадров и необработанных схожи в целом. На рис. 5, *а* для необработанных кадров наблюдаются значительные флуктуации сигнала яркости по сравнению с сигналом яркости усреднённых и обработанных кадров, что отражает значительную зашумлённость необработанных изображений. Помимо флуктуаций, наблюдаются глобальные изменения уровня яркости, обусловленные особенностями работы ЭОП [4].

Исходя из рис. 5, *б*, кадры, обработанные фильтром Гаусса и 3D-фильтром, обладают выраженной «степенью» шумоподавления в связи со «сглаженностью» флуктуаций сигнала яркости. Однако такое сглаживание может быть выражено в потерях яркостной составляющей в некоторых областях изображения, что влияет на детализацию изображения и предположительно увеличивает ошибку определения дальности.

Среднее время обработки изображений, разрешение которого составляет 1032×772 пикселей, различными фильтрами, вычисление которого произведено в программной среде MATLAB при аппаратной поддержке intel core i5-6200U (2,3 ГГц), 4 Гб оперативной памяти, представлено в табл. 1.



Видеокадры: 1 – необработанный, 2 – усреднённый
а



1 – медианный фильтр (1×7);
2 – 3D-фильтр (сигма равна 25);
3 – фильтр Гаусса (СКО равно 7)
б

Рис. 5. Графики зависимостей значений яркости пикселей от номера пикселя в строке: *а* – необработанные и усреднённые кадры; *б* – обработанные кадры

Таблица 1

Среднее время обработки исходных изображений различными фильтрами

Название фильтра	Среднее время, мс
Фильтр Гаусса	2,3
Медианный фильтр	1,8
3D-фильтр	20000

Также была проведена оценка σ по выражению (2) (рис. 6, *а*) и ОСШ по выражению (1) (рис. 6, *б*) для кадров с первой АЗВ.

Из рис. 6, *а* видно, что графики зависимости СКО для обработанных и необработанных видеокадров схожи по характеру поведения. Наибольшие уровни СКО можно отнести к реальным кадрам в связи с отсутствием подавления на них шумовой составляющей. Общее снижение СКО с увеличением дальности предположительно связано с тем, что на ближних дистанциях значительный вклад шумовой составляющей вносит мультипликативный шум, а именно нестационарная компонента шума ЭОПа, величина которой пропорциональна интенсивности

регистрируемого светового потока. На дальних дистанциях интенсивность отражённого излучения от объектов гораздо меньше, чем на ближних дистанциях, соответственно, величина мультипликативной составляющей предположительно очень мала. Однако, исходя из графиков СКО, приведённые зависимости не принимают нулевые значения, а в целом сохраняют некоторый уровень (с 18 до 20 м), что предположительно связано с сохраняющимся вкладом аддитивной составляющей шума.

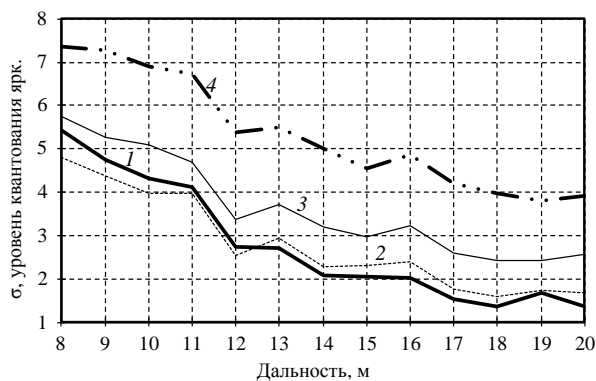


Рис. 6. Графики зависимости СКО и ОСШ от дальности:
 1 – фильтр Гаусса (СКО равно 7);
 2 – 3D-фильтр (сигма равна 25);
 3 – медианный фильтр (1×7); 4 – без обработки

Из рис. 6, б видно, что графики зависимости ОСШ для обработанных и необработанных кадров в целом схожи по поведению. На ближних дистанциях по значениям ОСШ наибольшая эффективность в задаче подавления шумовой составляющей достигается при применении фильтра Гаусса и 3D-фильтра. При увеличении дальности наблюдается значительное снижение ОСШ для кадров, поскольку к концу измеряемого диапазона существенно проявляется шумовая составляющая и значительно уменьшается интенсивность регистрируемого света (в связи с влиянием закона обратных квадратов). Исходя из рис. 6, б, лучшее шумоподавление достигается при применении фильтра Гаусса.

На рис. 7 приведена оценка измерительной функции, найденной посредством аппроксимации совокупности ОЯ, вычисленной по усреднённым кад-

рам полиномиальной функцией 5-й степени. Выбор полиномиальной функции 5-й степени обусловлен тем, что для данного вида функции наблюдается величина ошибок оценки дальности меньше, чем в случае использования линейной аппроксимирующей функции.

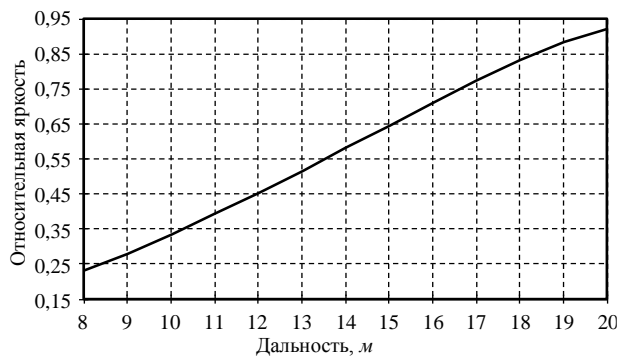


Рис. 7. Оценка измерительной функции

На рис. 8 приведён пример построенной карты глубин пространства по усреднённому изображению.

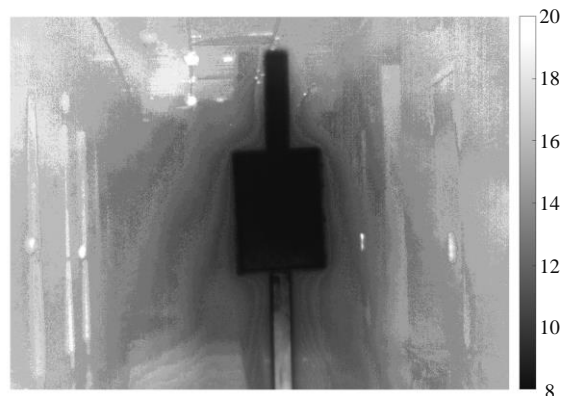


Рис. 8. Пример построенной карты глубин пространства по усреднённому изображению

На рис. 8 виден транспарант, чёрный цвет отображения которого в соответствии со шкалой справа сигнализирует о ближней дальности до него (около 8 м). Однако области около транспаранта выглядят неправдоподобно: за транспарантом не расположено других объектов, и поэтому области около транспаранта должны иметь светлые оттенки цвета близкие к максимальной дальности по шкале справа. Такое явление связано с особенностями работы ЭОПа, которое называется ореольностью.

После построения карт глубин пространства были вычислены АО по выражению (3) и в графическом виде отражены на рис. 9 как зависимость АО от значений дальности. Данный график содержит ограничение представляемых значений дистанции, поскольку для необработанных кадров и кадров, обработанных медианным фильтром, наблюдается значительная АО (до -1,5 м для необработанных).

По выражению (4) и данным, приведённым на рис. 9, были вычислены значения СКО (табл. 2) измерения дальности как интегральные оценки точности построения карт глубин.

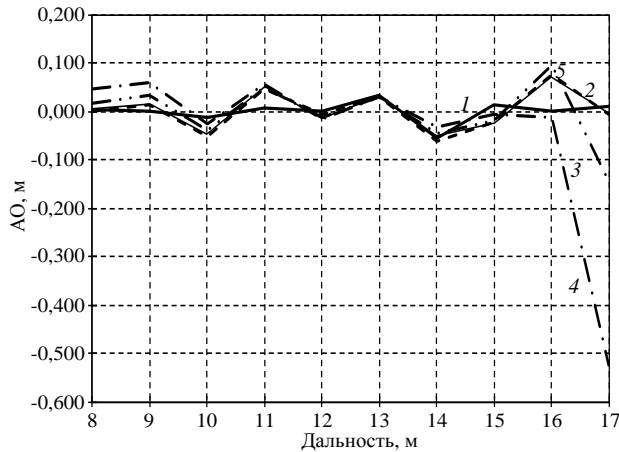


Рис. 9. Зависимости АО от дальности: 1 – усреднение; 2 – фильтр Гаусса (СКО равно 7); 3 – медианный фильтр (1×7); 4 – без обработки; 5 – 3D-фильтр (сигма равна 25)

Таблица 2

Результаты вычисления СКО	
Вид обработки кадров	СКО, м
Без обработки (реальные)	1,390
Фильтр Гаусса	0,045
Медианный фильтр	0,367
3D-фильтр	0,062
Усреднение	0,026

Необходимо отметить, что наблюдаемое на рис. 5, б значительное сглаживание флуктуаций сигнала яркости при использовании фильтра Гаусса влечёт за собой снижение детализации изображения, но на определяемые значения дальности до ОИ данный фактор имеет слабое влияние. Это связано с тем, что при определении дальности до ОИ используются средние значения яркости по полю ОИ, что некоторым образом уменьшает отклонение среднего значения яркости обработанного кадра от среднего значения яркости усреднённого (теоретически с отсутствующим шумом) кадра.

Заключение

Согласно данным, приведённым на рис. 6, видно, что наибольшая эффективность в решении задачи шумоподавления достигается при использовании фильтра Гаусса с размером апертуры, равной 7, и 3D-фильтра с параметром сигма, равным 25. По данным рис. 9 видно, что АО для усреднённых кадров минимальны на всей дистанции измерения, а также АО для случаев фильтра Гаусса и 3D-фильтра на дистанции до 17 м практически полностью совпадают, однако после 17 м для 3D-фильтра возрастают до -13,6 см, что вносит вклад в СКО для 3D-фильтра. По данным табл. 2 наименьшее значение СКО соответствует построению карт глубин по усреднённым кадрам (2,6 см). Обработка фильтром Гаусса обеспечивает СКО, равное 4,5 см. Несмотря на высокую эффективность шумоподавления в случае применения 3D-фильтра, по данным табл. 2 СКО для карт глубин, построенных по кадрам обработанных этим фильтром, составляет 6,2 см. К тому же по данным табл. 1 среднее время обработки 3D-фильтром на четыре

порядка больше, чем обработки фильтром Гаусса. Таким образом, фильтр Гаусса наиболее эффективен среди представленных для подавления специфического шума изображений АИ ТИС, и обеспечении приемлемой ошибки измерения дальности. Но использование кадров, обработанных фильтром Гаусса с СКО, равным 7, для построения «дальномерного портрета» ОИ с высоким пространственным разрешением является малоэффективным, поскольку чёткость в области измерения ОИ в значительной степени снижается, что делает невозможным отображение мелких деталей объекта.

Литература

- Капустин В.В. Активно-импульсные телевизионные измерительные системы с повышенной устойчивостью к оптическим помехам: дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2017. – 118 с.
- Конюхов А.Л. Критерии оценки отношения сигнал / шум в активно-импульсных телевизионно-вычислительных системах / А.Л. Конюхов, А.Г. Костевич, М.И. Курячий // Доклады ТУСУР. – 2012. – № 2 (26), ч. 1. – С. 111–115.
- Математическая обработка изображений системы дистанционного зондирования на базе электронно-оптического преобразователя / А.А. Ильин, А.Н. Виноградов, В.В. Егоров, А.П. Калинин, А.И. Родионов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2013. – Т. 10, № 3. – С. 106–113.
- Виноградов А.Н. Обработка изображений, полученных при дистанционном зондировании системами на базе ЭОП / А.Н. Виноградов, А.А. Ильин // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Сборник тезисов конференции: матер. VII Всерос. открытой ежегодной конф. – М.: ИКИ РАН, 2009. – Вып. 6.
- Тисленко А.А. Оценка точности построения карт глубин, полученных активно-импульсной телевизионной измерительной системой по усреднённым и реальным кадрам / А.А. Тисленко, А.С. Толмачева, А.К. Мовчан // Научная сессия ТУСУР-2023: сб. избр. статей научной сессии ТУСУР: матер. междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных. – Томск: ТУСУР, В-Спектр, 2023. – Ч. 1. – С. 109–113.
- Новгородов А.А. Исследование эффективности восстановления изображений, полученных активно-импульсной телевизионной системой с помощью сверточной нейронной сети шумоподавления / А.А. Новгородов, Н.А. Бородина, М. Назарбек // Электронные средства и системы управления: матер. XVII Междунар. науч.-техн. конф. – Томск: ТУСУР, В-Спектр, 2021. – Ч. 2. – С. 223–225.
- Сылкова Д.А. Повышение качества изображений активно-импульсных телевизионно-вычислительных систем с использованием алгоритмов инверсной фильтрации / Д.А. Сылкова, А.Н. Утемисов, В.В. Капустин // Доклады ТУСУР. – 2017. – Т. 20, № 4. – С. 39–42.
- High-resolution LIDAR-based depth mapping using bilateral filter / C. Premebida, L. Garrote., A. Asvadi, A.P. Ribeiro, U. Nunes // IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Rio de Janeiro, Brazil. – 2016. – P. 2469–2474. DOI: 10.1109/ITSC.2016.7795953.
- Tislenko A.A. Improving the Distance Measurement Accuracy of Active-Pulse Television Measuring Systems Using Polynomial Approximation / A.A. Tislenko, A.K. Movchan, V.V. Kapustin // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – 2022. – P. 1–6. DOI: 10.1109/SIBCON56144.2022.10002953.

10. Мовчан А.К. Методы и алгоритмы прецизионного измерения дальности в активно-импульсных телевизионных измерительных системах: дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2022. – 141 с.
11. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М.: Техносфера, 2012. – 1104 с.
12. Трёхмерная фильтрация изображений, искажённых смешанным мультипликативно-аддитивным шумом / В.Ф. Кравченко, В.И. Пономарев, В.И. Пустовойт, А. Паласиос-Энрикес // Доклады РАН. Математика, информатика, процессы управления. – 2020. – Вып. 494. – С. 414–417.
13. Ахизер Н.И. Лекции по теории аппроксимации. – М.: Гостехиздат, 1947. – 324 с.
14. Галеев Э.М. Теория аппроксимации. – Баку: Изд-во МГУ, 2016. – 108 с.
15. Данилов А.М. Интерполяция, аппроксимация, оптимизация: анализ и синтез сложных систем / А.М. Данилов, И.А. Гарькина. – Пенза: ПГУАС, 2014. – 168 с.
16. Монич Ю.И. Оценки качества для анализа цифровых изображений / Ю.И. Монич, В.В. Старовойтов // Искусственный интеллект. – 2008. – № 4. – С. 376–386.

Тисленко Алексей Александрович

Магистрант каф. телевидения и управления (ТУ)
Томского государственного ун-та
систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Ленина пр-т., 40, г. Томск, Россия, 643050
ORCID: 0009-0009-8082-6753
Тел.: +7-952-894-07-51
Эл. почта: tislenco_1999-2012@mail.ru

Tislenko A.A.

Improving the accuracy of depth maps generation in an active-pulse television measuring system using digital image filtering

A study was carried out to improve the accuracy of maps generation for spatial depths in an active-pulse television measuring system built on the basis of an image intensifier, when processing the output images of the system with a Gaussian filter, a median filter and a 3D filter. A comparative assessment of the quality of the resulting images and an assessment of the range measurement were carried out. It is shown that the use of Gaussian filtering provides one of the highest efficiencies of noise suppression on images obtained by an active-pulse television measuring system built on the basis of an image intensifier, and thereby makes it possible to generate maps of spatial depths with the highest accuracy when using the result of finding the measuring functions using the approximation method. The achieved parameters of the system under consideration include the accuracy of constructing spatial depth maps, which is equal to 4.5 cm.

Keywords: filtering, image intensifier tube, noise component, signal-to-noise ratio, range measurement.

doi: 10.21293/1818-0442-2023-26-3-41-48

References

1. Kapustin V.V. Aktivno-impul'snyye televizionnyye izmeritel'nyye sistemy s povyshennoy ustoychivost'yu k opticheskim pomexkam [Active-pulse television measuring systems with increased resistance to optical interference. Dissertation for Candidate of sciences title]. Tomsk, 2017, 118 p. (in Russ.).

2. Konyukhov A.L., Kostevich A.G., Kuryachiy M.I. Kriterii otsenki otnosheniya signal/shum v aktivno-impul'snykh televizionno-vychislitel'nykh sistemakh [Criteria for assessing the signal-to-noise ratio in active-pulse television-computing channels]. *Proceedings of TUSUR University*, 2012, no. 2 (26), pt. 1, pp. 111–115. (in Russ.).

3. Ilyin A.A., Vinogradov A.N., Egorov V.V., Kalinin A.P., Rodionov A.I. Matematicheskaya obrabotka izobrazheniy sistemy distan-tsionnogo zondirovaniya na baze elektronno-opticheskogo preobrazovatelya [Mathematical processing of images of a remote sensing system based on an image intensifier tube]. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa [Modern Problems of Remote Sensing of the Earth from Space]*, 2013, vol. 10, no. 3, pp. 106–113 (in Russ.).

4. Vinogradov A.N., Ilyin A.A. Obrabotka izobrazheniy, poluchennykh pri distantsionnom zondirovanii sistemami na baze EOP [Processing of Images Obtained by Remote Sensing Systems Based on Image Intensifier]. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. Sbornik tezisov konferentsii: Materi-aly Sed'moy Vserossiyskoy otkrytoy yezhegodnoy konfe-rentsii [Modern Problems of Remote Sensing of the Earth from Space. Collection of Abstracts of the Conference: Proceedings of the Seventh All-Russian Open Annual Conference]*. Moscow, IKI RAS, 2013, vol. 6 (in Russ.).

5. Tislenko A.A., Tolmacheva A.S., Movchan A.K. Issledovaniye effektivnosti vosstanovleniya izobrazhe-niy, poluchennykh aktivno-impul'snoy televizionnoy si-stemoy s pomoshch'yu svertochnoy neyronnoy seti shumopo-davleniya [Assessment of the accuracy of building depth maps obtained by an active-pulse television measuring system using averaged and real frames]. *Nauchnaya sessiya TUSUR–2023. Sbornik izbrannykh statey nauchnoy sessii TUSUR: Materialy Mezhdunarodnoy Nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchonykh [Scientific session TUSUR-2023. Collection of selected articles of the TUSUR scientific session: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists]*. Tomsk, TUSUR, 2023. Part 1, pp. 109–113 (in Russ.).

6. Novgorodov A.A., Borodina N.A., Nazarbek M. [Investigation of the efficiency of restoring images obtained by an active-pulse television system using a convolutional neural network for noise reduction]. *Elektronnyye sredstva i sistemy upravleniya: Materialy XVII Mezhdunarodnoy Nauchno-tekhnicheskoy konferentsii [Electronic Devices and Control Systems: Proceedings of the XVII International Scientific and Technical Conference]*. Tomsk, TUSUR, 2021, part 2, pp. 223–225 (in Russ.).

7. Sytkova D.A., Utemisov A.N., Kapustin V.V. Povysheniye kachestva izobrazheniy aktivno-impul'snykh televizionno-vychislitel'nykh sistem s ispol'zovaniyem algoritmov inverznoy fil'tratsii [Improving the quality of images of active-pulse television computing systems using inverse filtering algorithms]. *Proceedings of TUSUR University*, 2017, vol. 20, no. 4, pp. 39–42 (in Russ.).

8. Premebida C., Garrote L., Asvadi A., Ribeiro A.P., Nunes U. High-resolution LIDAR-based depth mapping using bilateral filter, *IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Rio de Janeiro, Brazil, 2016, pp. 2469–2474. DOI: 10.1109/ITSC.2016.7795953.

9. Tislenko A.A. Improving the Distance Measurement Accuracy of Active-Pulse Television Measuring Systems Using Polyno-mial Approximation / A.A. Tislenko, A.K. Movchan, V.V. Kapustin // *International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*, 2022, pp. 1–6. DOI: 10.1109/SIBCON56144.2022.10002953

10. Movchan A.K. Metody i algoritmy pretzionnogo izmereniya dal'nosti v aktivno-impul'snykh televizionnykh izmeritel'nykh sistemakh [Methods and algorithms for precision

range measurement in active-pulse television measuring systems. Cand. Diss.]. Tomsk, 2022. 141 p. (in Russ.).

11. Gonzalez R., Woods R. Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy [Digital Image Processing]. Moscow, Technosphere, 2012, 1104 p. (in Russ.).

12. Kravchenko V.F., Ponomarev V.I., Pustovoi V.I., Palacios-Enriques A. Trekhmernaya fil'tratsiya izobrazheniy, iskazhonnykh smeshannym mul'tiplikativno-additivnym shumom [3D filtering of images distorted by mixed multiplicative-additive noise]. Doklady RAN. Matematika, informatika, protsessy upravleniya [Reports of the Russian Academy of Sciences. Mathematics, Informatics, Control Processes]. 2020, iss. 494, pp. 414–417 (in Russ.).

13. Akhiezer N.I. Lektsii po teorii approksimatsii [Lectures on Approximation Theory]. Moscow, Gostekhizdat, 1947, 324 p. (in Russ.).

14. Galeev E.M. *Teoriya approksimatsii* [Approximation theory]. Baku: branch of the publishing house of Moscow State University, 2016, 108 p. (in Russ.).

15. Danilov A.M., Garkina I.A. Interpolyatsiya, ap-proksimatsiya, optimizatsiya: analiz i sintez slozhnykh sistem

[Interpolation, approximation, optimization: analysis and synthesis of complex systems]. Penza: PGUAS, 2014, 168 p. (in Russ.).

16. Monich Y.I., Starovoitov V.V. Otsenki kachestva dlya analiza tsifrovyykh izobrazheniy [Quality assessments for digital image analysis]. *Iskusstvennyy intellekt [Artificial Intelligence]*, 2008, no. 4, pp. 376–386 (in Russ.).

Alexey A. Tislenko

Master student, Department of Television and Control (TC), Tomsk State University of Control Systems

and Radioelectronics (TUSUR)

40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 643050

ORCID: 0009-0009-8082-6753

Phone: +7-952-894-07-51

Email: tislenko_1999-2012@mail.ru

УДК 621.396

Л.И. Белова

Подход к определению срока сохраняемости электрорадиоизделий бортовой аппаратуры авиационной техники применительно к установленной модели внешних воздействующих факторов

Рассматриваются проблемы, возникающие при применении электрорадиоизделий (ЭРИ) бортовой аппаратуры авиационной техники, которые при эксплуатации основную часть времени находятся в режиме ожидания (хранения) в обесточенном состоянии с периодическим контролем работоспособности, и возможные пути решения этих проблем. Предложена методика оценки показателей сохраняемости, которая основана на определении характеристик ЭРИ для режима ожидания (хранения). Методика реализована на математических моделях с использованием значений энергии активации физико-химических процессов деградации ЭРИ бортовой аппаратуры авиационной техники. Применение для решения рассматриваемых проблем математических моделей может позволить наиболее эффективным образом прогнозировать надежность изделий. Приведены расчёты и сравнительный анализ значений минимального срока сохраняемости при повышенной температуре для нескольких групп ЭРИ бортовой аппаратуры авиационной техники.

Ключевые слова: бортовая аппаратура авиационной техники, надежность, показатели сохраняемости, электрорадиоизделия.

DOI: 10.21293/1818-0442-2023-26-3-49-52

Одним из важнейших требований, предъявляемых к бортовой аппаратуре авиационной техники, является надежность. Сегодня ни одно сложное изделие не проектируется без анализа его будущей надежности.

Основы надежности закладываются при разработке и производстве бортовой аппаратуры авиационной техники [1, 2].

Надежность – свойство объекта выполнять заданные функции, сохраняя во времени значения установленных эксплуатационных показателей в определенных пределах, соответствующих заданным режимам и условиям использования, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования [3].

Надежность бортовой аппаратуры авиационной техники в общем случае является комплексным свойством, которое в зависимости от назначения авиационной техники и условий ее применения может включать безотказность, ремонтпригодность, долговечность и сохраняемость.

Следует заметить, что основным фактором, который учитывается при разработке бортовой аппаратуры авиационной техники, является уровень качества комплектующей элементной базы.

В бортовой аппаратуре авиационной техники применяются ЭРИ высших уровней качества [4]:

– ЭРИ отечественного производства с уровнями качества «ОС», «ОСД», «ОСМ», «М» и «Н», а при их отсутствии – ЭРИ уровня качества «ВП» в соответствии с положением об электрорадиоизделиях с индексом «ОС»;

– ЭРИ иностранного производства (ЭРИ ИП), соответствующие требованиям Европейского космического агентства или военных стандартов США для применения в космической технике по MIL-PRF-38535 (для интегральных микросхем), MIL PRF-38534 (для

гибридных микросхем), MIL-PRF-19500 (для полупроводниковых приборов).

Примененные ЭРИ должны соответствовать определенным условиям: иметь необходимый запас по сроку сохраняемости, исходя из гарантийного срока эксплуатации бортовой аппаратуры авиационной техники и технологического цикла ее изготовления.

Нередко возникают значительные трудности при расчете надежности бортовой аппаратуры авиационной техники (для различных моделей внешних воздействующих факторов (ВВФ)), которая при эксплуатации основную часть времени находится в режиме ожидания (хранения) в обесточенном состоянии с периодическим контролем работоспособности. Как известно, для такой бортовой аппаратуры авиационной техники следует рассчитывать интенсивность отказов ЭРИ по моделям, которые отличаются от моделей эксплуатационной интенсивности отказов [5].

Что же касается ЭРИ ИП (или их отечественных аналогов), то для них такие модели в нормативно-технической документации зачастую не приводятся. По аналогии с ЭРИ отечественного производства, сроки сохраняемости и годности которых отображены в технических условиях, интересующие данные можно найти в datasheet производителя. Однако не все компании и не на все ЭРИ указывают эти данные.

Для решения этой проблемы предлагается методика расчета срока сохраняемости ЭРИ бортовой аппаратуры авиационной техники применительно к установленной модели ВВФ.

Методика расчета срока сохраняемости ЭРИ бортовой аппаратуры авиационной техники для различных моделей внешних воздействующих факторов

Минимальный срок сохраняемости $T_{cx.min}$ задается для условий длительного хранения изделий военной техники в заводской упаковке (укладке) или

в законсервированном виде (с одновременным указанием условий хранения), а также периодичности проверок технического состояния и переконсервации [6].

Расчетная формула минимального срока сохраняемости по экспоненциальному закону определяется [6, 7]

$$T_{\text{сх.}\gamma} = -(\ln \gamma / \lambda_{\text{э.х}}), \quad (1)$$

где $\lambda_{\text{э.х}}$ – интенсивность отказов ЭРИ при хранении.

Также в соответствии с [7–9] минимальный срок сохраняемости $T_{\text{сх.}\min}$, который является аналогом назначенного срока $T_{\text{сл.}\min}$ и составляет некоторую фиксированную часть гамма-процентного срока сохраняемости, определяется по формуле

$$T_{\text{сл.}\min} = T_{\text{сх.}\min} = d \cdot T_{\text{сх.}\gamma}, \quad (2)$$

где $d < 1$ – заданное фиксированное число; $T_{\text{сх.}\gamma}$ – гамма-процентный срок сохраняемости при некотором заданном значении γ (обычно $\gamma \geq 90\%$ – для ЭРИ с ограниченным ресурсом и $\gamma = 95\%$ – для ЭРИ с относительно большим ресурсом).

В соответствии со справочником [10], интенсивность отказов $\lambda_{\text{э.х}}$ групп ЭРИ в режиме ожидания (хранения) может быть представлена следующей математической моделью:

$$\lambda_{\text{э.х}} = \lambda_{\text{б.с.г.х}} \cdot K_{t,x} \cdot \prod_{i=1}^n K_i, \quad (3)$$

где $\lambda_{\text{б.с.г.х}}$ – базовая интенсивность отказов ЭРИ при хранении в нормальных условиях; $K_{t,x}$ – коэффициент, зависящий от фактической температуры хранения; K_i – коэффициент модели, не зависящий от температуры; n – количество коэффициентов.

Для большинства ЭРИ коэффициент $K_{t,x}$ может быть вычислен по формуле [3, 8]

$$K_{t,x} = A \cdot e^{-\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{t_2+273} - \frac{1}{298} \right)}, \quad (4)$$

где E_a – энергия активации физико-химических процессов деградации ЭРИ, эВ; k – постоянная Больцмана (равная $8,615 \cdot 10^{-5}$ эВ/°С); t – фактическая температура хранения, °С; A – постоянный коэффициент, не зависящий от температуры.

Приведенная модель используется в диапазоне температур от минимальной температуры хранения

до максимально допустимой по нормативно-технической документации для каждого типа изделий.

В результате преобразования, подставив (1), (3), (4) в формулу (2), получается следующее выражение:

$$T_{\text{сл.}\min} = T_{\text{сх.}\min} = -d \cdot \frac{\ln \gamma}{\lambda_{\text{б.с.г.х}}} \prod_{i=1}^n K_i \cdot A \cdot t^{-\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{t_2+273} - \frac{1}{298} \right)}. \quad (5)$$

Составляется отношение срока службы (срока сохраняемости), вычисленное при двух значениях температуры t_1 и t_2 .

Поскольку d , γ , $\lambda_{\text{б.с.г.х}}$, K_i , A не зависят от температуры, получается формула расчёта, которая после простых преобразований будет иметь следующий вид:

$$\frac{T_{\text{сл.}\min}(t_1)}{T_{\text{сл.}\min}(t_2)} = \frac{T_{\text{сх.}\min}(t_1)}{T_{\text{сх.}\min}(t_2)} = e^{-\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{t_2+273} - \frac{1}{t_1+273} \right)}. \quad (6)$$

Пусть известно значение $T_{\text{сл.}\min} = T_{\text{сх.}\min}$ при температуре t_1 , в соответствии с (6) при температуре t_2 минимальный срок службы (минимальный срок сохраняемости) будет равен

$$T_{\text{сл.}\min}(t_2) = T_{\text{сх.}\min}(t_2) = \frac{T_{\text{сл.}\min}(t_1)}{e^{-\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{t_2+273} - \frac{1}{t_1+273} \right)}}. \quad (7)$$

Используя соотношение (7), можно рассчитать минимальный срок службы (минимальный срок сохраняемости) для ЭРИ применительно к установленной моделью внешних воздействующих факторов ВВФ.

Результаты расчета сроков сохраняемости ЭРИ бортовой аппаратуры авиационной техники

Для наиболее используемых в бортовой аппаратуре авиационной техники групп ЭРИ был проведен согласно полученному выражению (7) расчет минимального срока сохраняемости для вертолетов, дозвуковых самолетов, сверхзвуковых самолетов (табл. 1).

За известную величину $T_{\text{сл.}\min}(t_1)$ был взят из технических условий усредненный срок сохраняемости ЭРИ при диапазоне изменения значения температуры окружающей среды от -60 до $+85$ °С.

Результаты расчёта полученного минимального срока службы (минимального срока сохраняемости) в соответствии с заданными значениями энергии активации E_a для групп ЭРИ приведены в табл. 2.

Таблица 1

Модель ВВФ, воздействующих на ЭРИ

Наименование ВВФ	Наименование характеристик ВВФ, °С	Значение воздействующих факторов для групп аппаратуры		
		вертолетов	дозвуковых самолетов	сверхзвуковых самолетов
1. Повышенная температура среды	Рабочая	55	55	55
	Предельная	70	70	80
2. Пониженная температура среды	Рабочая	-60	-60	-60
	Предельная (без конденсации влаги)	-65	-65	-65
3. Изменение температуры среды (без конденсации влаги)	Диапазон	От -65 до 70	От -65 до 70	От -65 до 80

**Значения минимального срока службы (минимального срока сохраняемости)
для групп ЭРИ при повышенной температуре среды**

№ п/п	Группы ЭРИ	E_a , эВ [10]	$T_{сл}$ ($T_{сх}$), лет для модели ВВФ, выбранной для расчета	$T_{сл}$ ($T_{сх}$), лет для модели ВВФ, установленной для соответствующей группы аппаратуры	
				вертолетов, дозвуковых самолетов	сверхзвуковых самолетов
Интегральные микросхемы					
1	Цифровые МОП-технологии	0,35	20	32,8	23,5
2	Аналоговые	0,65		50	27
3	Микросхемы памяти	0,60		46,8	26,3
4	GaAs СВЧ	1,50		Более 100	40
Полупроводниковые приборы					
5	Диоды низкочастотные <i>все, кроме регуляторов тока и стабилизаторов</i>	0,27	20	29	22,5
6	Диоды низкочастотные <i>регуляторы тока, стабилизаторы</i>	0,17		25,5	21,6
7	Транзисторы биполярные низкочастотные	0,18		25,8	21,7
8	Транзисторы полевые низкочастотные	0,17		25,5	21,6
Оптоэлектронные полупроводниковые приборы					
9	Все группы оптоэлектронных полупроводниковых приборов, кроме лазерных диодов	1,50	20	Более 100	40
Резисторы					
10	Постоянные пленочные, в т.ч. поверхностного монтажа	0,08	20	22	20,7
11	Переменные проволочные <i>все, кроме полупрецизионных</i>	0,08	20	22	20,7
12	Переменные проволочные <i>полупрецизионные</i>	0,20	20	27	22
Конденсаторы					
13	Керамические постоянной ёмкости, в т.ч. поверхностного монтажа	0,35	20	33	23,5
14	Оксидно-полупроводниковые, в т.ч. поверхностного монтажа	0,15		24,7	21,4
15	Оксидно-электролитические алюминиевые	0,35		33	23,5
Соединители					
16	Соединители	0,14	20	24,3	21,3

Результаты расчета показывают, что все группы ЭРИ, приведенные в табл. 2, имеют срок сохраняемости не менее 20 лет.

Таким образом, используя соотношение (7), можно рассчитать минимальный срок службы (минимальный срок сохраняемости) для соответствующих групп ЭРИ применительно к установленной модели ВВФ.

Заключение

Предложенная методика оценки показателей сохраняемости основана на определении характеристик ЭРИ бортовой аппаратуры авиационной техники для режима ожидания (хранения) и позволяет использовать обобщенную математическую модель.

На основе предложенной методики получены значения минимального срока службы (минимального срока сохраняемости) для различных групп ЭРИ бортовой аппаратуры авиационной техники применительно к установленной модели ВВФ.

Представленный подход к расчету срока сохраняемости может быть реализован применительно к разным группам ЭРИ бортовой аппаратуры авиационной техники и к нескольким моделям ВВФ.

Литература

1. Инженерно-авиационная служба и эксплуатация летательных аппаратов. – М.: Военное изд-во МО СССР, 1971. – 450 с.
2. Куатов Б.Ж. Повышение надежности авиационной техники в процессе эксплуатации / Б.Ж. Куатов, А.З. Байсанов, Р.Р. Надрышин // Труды междунар. симпозиума «Надежность и качество». – 2016. – Т. 2. – С. 250–253.
3. Боровиков С.М. Расчет показателей надежности радиоэлектронных средств: учеб.-метод. пособие / С.М. Боровиков, И.Н. Цырельчук, Ф.Д. Троян. – Минск: БГУИР, 2010. – 62 с.
4. Иевлев В.И. Качество и надежность электронной компонентной базы ЭВМ специального назначения: учеб. пособие / В.И. Иевлев, Г.А. Филиппов. – Екатеринбург: УрФУ, 2013. – 102 с.

5. Захаров О.Г. Оценка показателей сохраняемости цифровых устройств релейной защиты // Современные технологии автоматизации. – 2013. – № 2. – С. 90–96.
6. ГОСТ РВ 27.3.01–2005. Надежность военной техники. Состав и общие правила задания требований к надежности – М.: Стандартиформ, 2005. – 34 с.
7. ГОСТ 27.003–2016. Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности. – М.: Госстандарт России, 2016. – 23 с.
8. ГОСТ В 20.39.403–81. Комплексная система общих технических требований. Изделия электронной техники, квантовой электроники и электротехнические военного назначения. Требования по надежности. – М.: Госстандарт России, 1981. – 45 с.
9. Сулейманова Л.И. Расчетное определение срока сохраняемости электрорадиоизделий иностранного производства / Л.И. Сулейманова, Т.И. Давыдова // Автоматизация процессов управления. – 2020. – № 4 (62). – С. 33–37.
10. Надежность электрорадиоизделий иностранного производства: справ. – М.: 22 ЦНИИ МО РФ, 2006. – 641 с.

Белова Лилия Ирфановна

Канд. техн. наук, вед. инженер ФНПЦ АО «НПО «Марс»
Солнечная ул., 20, г. Ульяновск, Россия, 432022
Тел.: +7-902-005-71-52
Эл. почта: suleimanova.lili@mail.ru

Belova L.I.

Approach to the assessment of the storage ability period of electronic components in airborne equipment as applied to the specified model of external impact factors

The article deals with challenges arising from the application of electronic components in airborne electronic hardware, which are in the standby / storage mode and de-energized most of the time when not in use, as well they are regularly checked for the proper functioning. The article also discusses some possible solutions to these problems. A technique for assessing storage ability indicators is proposed based on the electronic component properties characterization for the standby / storage mode. The technique is implemented on mathematical models using the activation energy values of the physical-chemical degradation process parameters of the electronic components in airborne equipment. The application of mathematical models addressed to solve the denoted problems can allow author to predict the dependability of electronic products. Some calculations and a comparative analysis of values of all parameters characterized the shortest storage ability period at higher temperature are presented for several groups of electronic components in airborne equipment.

Keywords: airborne electronic hardware, dependability, storage ability indicators, electronic components.

DOI: 10.21293/1818-0442-2023-26-3-49-52

References

1. *Inzhenerno-aviatsionnaya sluzhba i ekspluatatsiya letatelnykh apparatov* [Aviation Engineering Service and aircraft operation]. Moscow, Military Publishing House of the USSR Ministry of Defense, 1971, 450 p. (in Russ.).
2. Kuoatov B.Zh., Baisanov A.Z., Nadryshin R.R. [Improving the reliability of aircraft equipment during operation]. *International Symposium «Reliability and Quality»*, 2016, vol. 2, pp. 250–253 (in Russ.).
3. Borovikov S.M., Tsyrelchuk I.N., Troyan F.D. *Raschet pokazatelei nadezhnosti radioelektronnykh sredstv. Uchebno-metod. posobie* [Reliability Calculation of radioelectronic means. Study guide]. Minsk, BSUIR Publ., 2010. 62 p. (in Russ.).
4. Ievlev V.I., Filippov G.A. *Kachestvo i nadezhnost elektronnoy komponentnoy bazy EVM spetsialnogo naznacheniya. Uchebnoe posobie* [Quality and reliability of the electronic component base of an application-specific computer. Textbook]. Yekaterinburg, UrFU Publ., 2013, 102 p. (in Russ.).
5. Zakharov O.G. [Assessment of storability of protective relaying digital devices]. *Modern Automation Technologies*, 2013, no. 2, pp. 90–96 (in Russ.).
6. ГОСТ РВ 27.3.01–2005. *Nadezhnost voennoy tekhniki. Sostav i obschie pravila zadaniya trebovaniy k nadezhnosti* [Military equipment dependability. Contents and general rules for specifying dependability requirements]. Moscow, Standartinform Publ., 2005, 34 p. (in Russ.).
7. ГОСТ 27.003–2016. *Nadezhnost v tekhnike. Sostav i obschie pravila zadaniya trebovaniy k nadezhnosti* [Industrial product dependability. Contents and general rules for specifying dependability requirements]. Moscow, Gosstandart of Russia Publ., 2016, 23 p. (in Russ.).
8. ГОСТ В 20.39.403–81. *Kompleksnaya sistema obshchikh tekhnicheskikh trebovaniy. Izdeliya elektronnoy tekhniki, kvantovoy elektroniki i elektrotekhnicheskoy voennogo naznacheniya. Trebovaniya po nadezhnosti* [A complex system of general technical requirements. Electronic equipment, quantum electronics and electrical products of military purposes. Reliability requirements]. Moscow, Gosstandart of Russia Publ., 1981, 45 p. (in Russ.).
9. Suleymanova L.I., Davydova T.I. [Calculation of safety index for foreign-origin electronic components]. *Automation of Control Processes*, 2020, no. 4 (62), pp. 33–37 (in Russ.).
10. *Nadezhnost elektroradioizdeliy inostrannogo proizvodstva. Sprav.* [Reliability of foreign-origin electrical and radio products. Handbook]. Moscow, 22 TSNIИ МО РФ Publ., 2006, 641 p. (in Russ.).

Lilia I. Belova

Candidate of Sciences in Engineering, Leading Engineer,
FRPC JSC 'RPA 'Mars',
20, Solnechnaya Street, Ulyanovsk, Russia, 432022
Phone: +7-902-005-71-52
Email: suleimanova.lili@mail.ru

**УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И ИНФОРМАТИКА**

УДК 004.048

И.Б. Солиев, А.О. Савельев

Обзор существующих методов, подходов и технологий в области оценки актуальности и потенциала научно-технических направлений

В настоящее время существует множество методов, подходов и технологий в области оценки актуальности и потенциала научно-технических направлений. Это важная задача для развития науки и инноваций, а также для определения приоритетов и стратегий финансирования исследований. Проведены обзор и анализ существующих методов, подходов и технологий, а также их преимуществ и недостатков. Особое внимание уделено методам, основанным на анализе научных публикаций, патентов, цитирования, социальных сетей и экспертных оценок. Также рассмотрены перспективные направления для дальнейшего развития и усовершенствования методов оценки актуальности и потенциала научно-технических направлений; определены основные требования к автоматизированным системам управления научно-исследовательской деятельностью и анализируются их эффективность и преимущества.

Ключевые слова: научно-технические направления, оценка актуальности, оценка потенциала, анализ данных, системы управления данными, научные данные, управление знаниями, ограничения существующих подходов.

DOI: 10.21293/1818-0442-2023-26-3-55-64

Оценка актуальности и потенциала научно-технических направлений является одной из ключевых задач для развития науки и инноваций. Она позволяет определять приоритеты и стратегии финансирования исследований, выявлять перспективные области для научного прогресса и технологического лидерства, а также анализировать сильные и слабые стороны национальной и международной научной системы. Однако оценка актуальности и потенциала научно-технических направлений представляет собой сложную и многомерную задачу, которая требует применения различных методов, подходов и технологий.

Существует множество критериев и показателей для оценки актуальности и потенциала научно-технических направлений, таких как научная продуктивность, качество, влияние, релевантность, новизна, оригинальность, социальная значимость, экономическая эффективность и т.д. Кроме того, существует множество источников информации для оценки актуальности и потенциала научно-технических направлений, таких как научные публикации, патенты, цитирование, социальные сети, экспертные оценки и т.д. В связи с этим возникает необходимость систематизации и классификации существующих методов, подходов и технологий в области оценки актуальности и потенциала научно-технических направлений, а также анализа их преимуществ и недостатков. Целью данной работы является проведение такого обзора.

Оценка актуальности и потенциала научно-технических направлений имеет большое значение не только для научного сообщества, но и для государственных и частных организаций, заинтересованных в развитии и внедрении инноваций. Оценка актуальности и потенциала научно-технических направлений позволяет формировать научную политику, планировать бюджеты и ресурсы, прогнозировать рыночный спрос и конкурентоспособность, а также оценивать социальный эффект и вклад науки в решение глобальных проблем.

Однако, как уже было отмечено, оценка актуальности и потенциала научно-технических направлений представляет собой сложную и многомерную задачу, которая требует комплексного и системного подхода. В литературе по данной теме можно выделить несколько основных аспектов, которые заслуживают внимания при оценке актуальности и потенциала научно-технических направлений [1].

Методологический аспект

Он связан с выбором подходящих методов, подходов и технологий для оценки актуальности и потенциала научно-технических направлений, а также с обоснованием их применимости и достоверности. В этом аспекте важно учитывать цели, задачи, контекст и ограничения оценки, а также специфику и характеристики научно-технических направлений.

Информационный аспект

Заключается в выборе подходящих источников информации для оценки актуальности и потенциала научно-технических направлений, а также в обработке, анализе и интерпретации полученных данных. Аспект учитывает качество, доступность и актуальность информации, а также возможность ее интеграции из разных источников [2, 3].

Организационный аспект

Связан с выбором подходящих форм и механизмов организации процесса оценки актуальности и потенциала научно-технических направлений, а также с управлением ресурсами, рисками и заинтересованными сторонами. В этом аспекте важно учитывать эффективность, экономичность, прозрачность и открытость процесса оценки, а также возможность его мониторинга, корректировки и обратной связи.

В данной работе мы сосредоточимся на методологическом и информационном аспектах оценки актуальности и потенциала научно-технических направлений, поскольку они являются основой для выбора и применения конкретных методов, подходов

и технологий. Организационный аспект мы косвенно затронем при рассмотрении преимуществ и недостатков различных методов, подходов и технологий.

В следующих разделах мы подробно рассмотрим различные методы, подходы и технологии в области оценки актуальности и потенциала научно-технических направлений, а также их классификацию, сравнение и перспективы.

Методы в области оценки актуальности и потенциала научно-технических направлений

Методы, основанные на анализе научных публикаций, используют информацию, содержащуюся в научных статьях, такую как тема, авторы, ключевые слова, аннотация, ссылки, цитаты и т.д., для определения актуальности и потенциала научно-технических направлений. Среди этих методов можно выделить библиометрический анализ, научную картографию, тематическое моделирование, семантический анализ и т.д. [4].

Методы, основанные на анализе патентов, используют информацию, содержащуюся в патентах, такую как изобретение, заявитель, классификация, описание, претензии, цитаты и т.д., для определения актуальности и потенциала научно-технических направлений. Среди этих методов можно выделить патентный анализ, технологическое прогнозирование, технологическое сопоставление и т.д.

Методы, основанные на анализе социальных сетей, используют информацию, содержащуюся в социальных сетях, такую как профили, сообщения, комментарии, лайки, репосты, хештеги и т.д., для определения актуальности и потенциала научно-технических направлений. Среди этих методов можно выделить социальный анализ, социальный мониторинг, социальное моделирование и т.д.

Методы, основанные на экспертных оценках, используют мнения и оценки экспертов в разных областях науки и техники для определения актуальности и потенциала научно-технических направлений. Среди этих методов можно выделить экспертные опросы, экспертные панели, Дельфи-метод и т.д.

С помощью этих методов могут быть оценены различные научно-технические направления, которые имеют отражение в научных публикациях, патентах, социальных сетях или экспертных оценках. Например, можно оценить актуальность и потенциал таких направлений, как нанотехнологии, искусственный интеллект, космические исследования и т.п.

В зависимости от целей и задач оценки можно выбрать любое другое научно-техническое направление, которое имеет достаточную информационную базу для анализа.

Проблемы и задачи управления научной деятельностью

Научно-техническое направление включает в себя ряд задач и вопросов, которые имеют решающее значение для успеха исследовательских проектов. Некоторые из ключевых задач, связанных с управлением научной деятельностью, включают планирование проекта, распределение ресурсов, сбор, анализ и

распространение данных [5, 6]. Эти задачи требуют координации и сотрудничества между исследователями, руководителями проектов, спонсорами и администраторами учреждений и должны быть выполнены в установленные сроки и с учетом бюджета. Эффективное научно-техническое направление включает в себя ряд задач и вопросов, которые необходимо решить для обеспечения успеха исследовательских проектов. Планирование проекта – это важнейшая задача, которая включает в себя определение целей проекта, определение результатов проекта, установление сроков и распределение ресурсов. Правильное планирование проекта гарантирует, что исследовательские проекты будут завершены в установленные сроки и с учетом бюджета [7].

Эффективное научно-техническое направление имеет решающее значение для обеспечения своевременного завершения исследовательских проектов в рамках бюджета и получения высококачественных результатов.

В дополнение к задачам и проблемам, рассмотренным выше, научно-техническое направление также включает в себя различные этапы, которые необходимо учитывать на протяжении всего жизненного цикла исследовательского проекта [8].

Генерация идей. Этот этап включает в себя генерацию идей для исследовательских проектов на основе существующих пробелов в знаниях или новых областей интересов. Исследователи могут использовать ряд инструментов и методов для генерирования идей, таких как обзоры литературы, мозговые штурмы или сотрудничество с другими исследователями.

Разработка предложения. Как только идея сгенерирована, исследователи должны разработать предложение, в котором излагаются цели проекта, методология и ожидаемые результаты. Разработка предложений предполагает тщательное планирование и исследование, а также сотрудничество с другими заинтересованными сторонами, такими как финансирующие агентства или институциональные наблюдательные советы.

Планирование проекта. После утверждения предложения исследователи должны разработать подробный план проекта, в котором изложены задачи, сроки и требования к ресурсам для проекта. Планирование проекта включает в себя выявление рисков и неопределенностей, разработку планов действий на случай непредвиденных обстоятельств и эффективное распределение ресурсов.

Сбор и анализ данных. Этот этап включает в себя сбор и анализ данных с использованием соответствующих методов и приемов исследования. Исследователи должны обеспечить тщательный и систематический сбор данных для обеспечения достоверности и надежности результатов исследования [9].

Распространение результатов. После анализа данных исследователи должны распространить свои результаты среди других исследователей, заинтересованных сторон и широкой общественности. Распространение может включать написание статей или

отчетов, представление результатов на конференциях или семинарах или использование социальных сетей или других платформ для обмена результатами исследований.

Оценка проекта. Исследователи должны оценить успех проекта, принимая во внимание цели проекта, сроки и требования к ресурсам. Оценка может включать оценку качества и воздействия результатов исследования, а также определение областей для улучшения в будущих исследовательских проектах.

В целом эффективное научно-техническое направление требует пристального внимания к каждому из этих этапов, а также к задачам и вопросам, рассмотренным ранее. Решая эти задачи и этапы на протяжении всего жизненного цикла исследовательского проекта, исследователи могут гарантировать успешное завершение своих проектов и внести свой вклад в развитие научных знаний.

Анализ предметной области научно-технических направлений уже много лет представляет интерес для исследователей и практиков.

В результате были разработаны различные методы, подходы и технологии для автоматизации процессов управления научной деятельностью. В этом разделе мы представим обзор некоторых существующих методов, подходов и технологий, которые обычно используются для автоматизации процессов управления научной деятельностью [10].

Программное обеспечение для управления проектами является мощным инструментом для автоматизации задач управления проектами, таких как планирование, распределение ресурсов и отслеживание прогресса, оно может помочь исследователям более эффективно управлять проектами, позволяя им завершать проекты в срок, в рамках бюджета и с высококачественными результатами.

Платформы для совместной работы позволяют исследователям работать более эффективно, предоставляя централизованную платформу для общения, обмена файлами и совместной работы. Эти платформы могут помочь улучшить сотрудничество и координацию между исследователями, повышая эффективность исследовательских проектов.

Системы управления данными используются для хранения, организации и анализа данных, собранных в ходе научно-исследовательских проектов [11]. Эти системы могут помочь исследователям более эффективно управлять большими объемами данных, позволяя им принимать более обоснованные решения и делать более точные выводы из своих исследований.

Автоматизация рабочего процесса включает автоматизацию повторяющихся задач, связанных с научными исследованиями, таких как ввод данных, формирование отчетов и контроль качества. Автоматизация рабочего процесса может помочь повысить эффективность и точность научно-исследовательских проектов, позволяя исследователям выполнять проекты быстрее и с меньшим количеством ошибок.

Искусственный интеллект (ИИ) все чаще используется для автоматизации задач научных исследований, таких как анализ данных и моделирование. Алгоритмы искусственного интеллекта могут помочь исследователям быстрее и точнее анализировать большие объемы данных, позволяя им принимать более обоснованные решения и делать более точные выводы из своих исследований [12].

Интернет вещей (IoT) предполагает использование датчиков и других устройств для сбора данных из физической среды. Устройства интернета вещей могут использоваться для сбора данных во время научно-исследовательских проектов, предоставляя исследователям огромное количество данных в режиме реального времени, которые можно анализировать и использовать для принятия более обоснованных решений [13, 14].

Используя эти инструменты и методы, исследователи могут повысить эффективность своих исследовательских проектов, что позволяет им принимать более обоснованные решения и делать более точные выводы из своих исследований.

Однако важно отметить, что не все методы, подходы и технологии одинаково эффективны для автоматизации процессов управления научной деятельностью. Различные инструменты и методы могут лучше подходить для разных этапов жизненного цикла исследовательского проекта или для разных типов исследовательских проектов.

К примеру, программное обеспечение для управления проектами и платформы для совместной работы могут быть особенно полезны для управления этапами разработки предложений и планирования исследовательских проектов [15]. Эти инструменты могут помочь исследователям более эффективно планировать и организовывать свои проекты, сотрудничать с другими заинтересованными сторонами и отслеживать прогресс в достижении основных этапов проекта.

Системы управления данными и автоматизация рабочих процессов, с другой стороны, могут быть более полезными на этапах сбора данных и анализа исследовательских проектов. Эти инструменты могут помочь исследователям более эффективно управлять большими объемами данных, автоматизировать повторяющиеся задачи и обеспечить точность и обоснованность результатов исследований. Технологии искусственного интеллекта и интернета вещей могут быть особенно полезны для задач анализа данных и моделирования, поскольку эти инструменты могут быстро и точно анализировать большие объемы данных, позволяя исследователям принимать более обоснованные решения и делать более точные выводы из своих исследований [16].

Также стоит отметить, что использование технологий автоматизации в управлении научной деятельностью не лишено своих проблем. Одной из главных проблем является обеспечение точности и достоверности данных, собираемых и анализируемых с помощью автоматизированных систем. Исследователи должны быть осторожны при проверке данных, собранных с использованием автоматизированных

систем, поскольку ошибки и неточности могут оказать существенное влияние на достоверность и надежность результатов исследований.

Кроме того, использование технологий автоматизации может также вызвать этические и социальные проблемы, особенно в таких областях, как искусственный интеллект. Исследователи должны знать об этих проблемах и предпринимать шаги для их решения, такие как обеспечение этического использования данных и минимизация рисков непреднамеренных последствий или предвзятости [17].

Автоматизация процессов управления научной деятельностью может помочь исследователям более эффективно управлять своими проектами, позволяя им завершать проекты в срок, в рамках бюджета и с высококачественными результатами [18]. Однако важно выбрать и внедрить соответствующие методы и программное обеспечение, которые хорошо подходят для конкретных потребностей нашего исследовательского проекта, а также решить проблемы и этические соображения, связанные с технологиями автоматизации.

Спецификация требований к методам и программному обеспечению для научно-технических направлений

В настоящее время автоматизация управления научной деятельностью становится все более актуальной задачей. Однако, чтобы создать программное обеспечение для автоматизации этого процесса, необходимо разработать спецификацию требований к методам и программному обеспечению. В данном разделе будет рассмотрена спецификация требований к методам и программному обеспечению для научно-технических направлений.

Был проведен анализ существующих методов для научно-технических направлений и прогнозирования перспективности отдельных научных направлений, который включает следующие элементы: *название методов; имена авторов; суть работы; преимущества; недостатки; решенные задачи.*

В таблице представлен анализ существующих методов, который позволяет выбрать наиболее подходящие и эффективные подходы для научно-технических направлений.

Сравнительный анализ существующих методов для научно-технических направлений

№	Название метода	Автор	Суть работы	Преимущества метода	Недостатки метода	Решенные задачи
1	2	3	4	5	6	7
1	Кластерный подход для фильтрации тематик в рамках систематических обзоров литературы	Tim Weißer, Till Saßmannshausen, Dennis Ohrndorf, Peter Burggräf, Johannes Wagner [10]	Представлен подход к кластеризации и фильтрации тематик в систематических обзорах литературы. Авторы предлагают использовать методы кластерного анализа для группировки научных статей по схожим тематикам. Затем применяется фильтрация, чтобы отобрать только наиболее релевантные темы для дальнейшего изучения	Позволяет автоматизировать процесс кластеризации и фильтрации тематик в систематических обзорах литературы, что экономит время и ресурсы исследователей. Позволяет более эффективно организовать и структурировать большие объемы научной литературы. Улучшает качество систематических обзоров, исключая нерелевантные темы и сфокусировавшись на ключевых аспектах	Зависимость от качества данных и правильности выбора алгоритма кластеризации. Неправильный выбор алгоритма или некачественные данные могут привести к неправильной группировке тематик или упущению важных аспектов. Возможность потери информации при фильтрации тематик. Если фильтрация проводится слишком строго, могут быть упущены релевантные темы или связанные работы	Предложенный подход позволяет автоматизировать процесс кластеризации и фильтрации тематик в систематических обзорах литературы, что упрощает и ускоряет работу исследователей. Кластеризация помогает структурировать большие объемы научной литературы и выделять ключевые темы для дальнейшего анализа. Фильтрация позволяет отбирать только наиболее релевантные темы, что повышает качество систематических обзоров
2	Анализ эволюции научных сетей сотрудничества для прогнозирования новых совместных авторств	Felipe Affonso, Monique de Oliveira Santiago, Thiago Magela Rodrigues Dias [12]	Суть работы заключается в анализе эволюции сетей научного сотрудничества с целью прогнозирования новых совместных авторств	Позволяет прогнозировать новые совместные авторства в научных публикациях. Может помочь исследователям и научным организациям находить потенциальных коллег для сотрудничества.	Метод основан на исторических данных и не может предсказать новые формы сотрудничества, которые могут возникнуть в будущем. Точность прогнозов может зависеть от доступности и качества исходных данных	Исследование помогает идентифицировать закономерности и тенденции в сотрудничестве между учеными, что может помочь в прогнозировании будущих совместных авторств.

Продолжение таблицы

1	2	3	4	5	6	7
			Исследователи, исследовали исторические данные о научных публикациях и сетях сотрудничества, чтобы выявить закономерности и тенденции в сотрудничестве между учеными	Улучшает понимание эволюции научных сетей и развития сотрудничества		Позволяет исследователям и научным организациям принимать более обоснованные решения о потенциальных партнерах для сотрудничества
3	Методология для извлечения знаний из обученных искусственных нейронных сетей	Andrey Bondarenko, Ludmila Alekseejeva [13].	Суть работы заключается в разработке методологии и инструментов для извлечения знаний из обученных искусственных нейронных сетей (ИНС). Эта работа исследует методы анализа ИНС, чтобы понять, как они принимают решения и как можно извлечь эти знания из них	Извлечение знаний из обученных ИНС позволяет получить понимание процессов, происходящих внутри сети, и объяснить принимаемые ею решения. Понимание знаний, полученных из ИНС, может привести к улучшению их интерпретируемости и надежности. Методология предоставляет инструменты для извлечения и анализа скрытых закономерностей и паттернов, которые были обнаружены ИНС	Процесс извлечения знаний из ИНС может быть сложным и требует глубоких знаний в области искусственного интеллекта и нейронных сетей. Извлечение знаний может быть ограничено структурой и архитектурой конкретной ИНС. При извлечении знаний могут возникнуть трудности в интерпретации и понимании полученных результатов	Методология предоставляет систематический подход к извлечению знаний из обученных ИНС, что помогает исследователям и практикам понять и объяснить работу ИНС. Извлечение знаний позволяет обнаружить скрытые закономерности и паттерны в данных, которые могут быть полезны для принятия решений и создания новых моделей
4	Извлечение и проверка научных данных для идентификации публикаций в журналах с открытым доступом	Patrícia Mascarenhas Dias, Thiago Magela Rodrigues Dias, Gray Farias Moita, Adilson Luiz Pinto [14]	Целью работы было разработать методологию и инструменты для автоматизированного сбора и проверки научных публикаций, опубликованных в открытом доступе	Автоматизация процесса извлечения и проверки научных данных позволяет существенно сэкономить время и ресурсы исследователей. Улучшает точность и надежность сбора данных путем использования алгоритмов и инструментов для проверки достоверности и подлинности публикаций. Обеспечивает доступ к научным публикациям в открытом доступе, что способствует распространению знаний и содействует научному прогрессу	Сложность и сложность разработки и реализации методологии и инструментов для извлечения и проверки научных данных. Возможность ошибок при автоматизированной обработке данных, которые могут повлиять на точность и надежность результатов. Ограничения и ограничения в отношении источников данных, доступных для извлечения и проверки	Разработаны методология и инструменты для автоматизированного сбора и проверки научных публикаций в журналах с открытым доступом. Позволяет исследователям быстро и эффективно получать доступ к актуальным научным публикациям
5	Использование синтаксического анализа текста для оценки сложности и комплексности образовательных задач	Naumov and V.S. Vykhovanets [6]	Суть работы заключается в исследовании и применении синтаксического анализа текста для оценки уровня сложности и комплексности образовательных задач.	Автоматическая оценка сложности и комплексности образовательных задач, что позволяет сократить время и ресурсы, затрачиваемые на оценку задач вручную.	Ограничения применения метода только к задачам, представленным в текстовом формате, что может ограничить его применимость в некоторых образовательных областях.	Метод предоставляет возможность автоматической оценки сложности и комплексности образовательных задач, что помогает учителям и авторам задач более точно адаптировать задания под потребности учащихся

Продолжение таблицы

1	2	3	4	5	6	7
				Использование синтаксического анализа текста позволяет учитывать структуру и связи между элементами задачи, что может дать более точные результаты, чем простое анализирование ключевых слов или фраз	Необходимость наличия большой и разнообразной выборки образовательных задач для обучения модели анализа, чтобы достичь хороших результатов	
6	Интеллектуальная система поддержки принятия решений для оценки научно-технического потенциала	Alexander Glushkov [19]	Автоматизация процесса оценки научно-технического потенциала, который включает в себя оценку текущего состояния научно-технического потенциала, выявление перспективных направлений развития науки и техники, а также разработку стратегии развития научно-технического потенциала	Интеллектуальная система позволяет автоматизировать сложный процесс оценки научно-технического потенциала, сокращает время, затрачиваемое на анализ данных, и уменьшает вероятность ошибок. Система обладает высокой степенью гибкости и может адаптироваться к различным условиям	Недостатки системы включают в себя высокую стоимость разработки и внедрения, а также сложность обучения персонала и интеграции с другими системами	Интеллектуальная система позволяет решить проблемы, связанные с трудоемкостью и низкой точностью процесса оценки научно-технического потенциала, а также помогает исследователям разрабатывать более эффективные стратегии развития научно-технического потенциала
7	Автоматизация информационных технологий управления научно-исследовательской деятельностью организации	D.A. Chizhov [20]	В данной работе рассматривается метод автоматизации информационных технологий управления научно-исследовательской деятельностью организации. Метод основан на использовании двух основных групп информационных технологий: организации управления проектами и комплексных информационных технологий. Первые предназначены для отслеживания работы от стадии планирования до её завершения, вторые – для обеспечения информационного взаимодействия всех участников процесса управления	Повышение эффективности управления: автоматизация позволяет сократить время и затраты на выполнение административных операций, повысить точность и достоверность данных, а также улучшить качество принятия управленческих решений. Улучшение координации и взаимодействия: автоматизация позволяет объединить в единую систему все данные и процессы управления, что способствует повышению координации и взаимодействия между различными подразделениями организации	Высокая стоимость внедрения: автоматизация требует значительных финансовых и организационных затрат. Требуется высокая квалификация персонала: для эксплуатации автоматизированных информационных систем необходим персонал, обладающий соответствующей квалификацией	Система позволяет осуществлять планирование и контроль научно-исследовательских работ на всех стадиях их жизненного цикла. Система позволяет осуществлять учет и анализ результатов научно-исследовательских работ, а также формировать отчетность по их результатам. Автоматизация взаимодействия участников научно-исследовательского процесса: система позволяет обеспечить информационное взаимодействие всех участников научно-исследовательского процесса, что способствует повышению координации и эффективности их работы

Окончание таблицы

1	2	3	4	5	6	7
8	Автоматизация процесса формирования отчетов по научно-исследовательской деятельности в университете	M.N. Barsukova and A.A. Romme [21]	В данной работе рассматривается метод автоматизации процесса формирования отчетов по научно-исследовательской деятельности в университете. Метод основан на использовании информационной системы, которая позволяет автоматизировать сбор, хранение, обработку и формирование отчетов по различным направлениям научно-исследовательской деятельности университета	Автоматизация позволяет сократить время и затраты на формирование отчетов, повысить точность и достоверность данных, а также обеспечить единообразие представления информации. Позволяет использовать современные методы анализа данных для получения более полной и объективной картины научно-исследовательской деятельности университета	Высокая стоимость внедрения: автоматизация требует значительных финансовых и организационных затрат. Требуется высокая квалификация персонала: для эксплуатации автоматизированной информационной системы необходим персонал, обладающий соответствующей квалификацией	Система позволяет автоматически собирать данные о научно-исследовательской деятельности университета из различных источников, таких как базы данных, электронные журналы и сборники научных трудов. Автоматически обрабатывать данные о научно-исследовательской деятельности университета, включая проверку на достоверность и полноту, а также формирование статистических и аналитических отчетов
9	Оценка эффективности научно-технического потенциала научно-исследовательских организаций	N.I. Skrigana, N.N. Skrigana and A.E. Chernysha [22]	В данной работе рассматриваются оценка научно-технической деятельности предприятий и организаций, показатели и критерии эффективности для оценки научно-технического потенциала организаций, а также рассматриваются несколько основных направлений развития для повышения эффективности потенциала научно-исследовательских предприятий и организаций	Метод основан на комплексном подходе к оценке научно-технического потенциала, учитывает различные аспекты его формирования и использования, а также соответствует международным стандартам	Метод требует большого объема информации и достоверности данных, а также сложен в реализации и интерпретации результатов	Определены основные факторы, влияющие на эффективность научно-технического потенциала; разработана методика оценки научно-технического потенциала; проведена оценка научно-технического потенциала некоторых научных организаций; предложены рекомендации по улучшению научно-технического потенциала
10	Проблемы и тенденции развития кадрового потенциала научно-технической сферы	S.V. Fedorova [23]	В данной работе анализируются структура и уровень квалификации кадрового потенциала научно-технической сферы, его роль и место в общей структуре трудовых ресурсов государства, тенденции развития и степень соответствия потребностям национальной экономики и национальной инновационной системы	Метод основан на сравнительном анализе статистических данных по различным показателям кадрового потенциала научно-технической сферы, а также на использовании международных рейтингов и индексов	Метод не учитывает специфику отдельных отраслей науки и техники, а также не углубляется в причины и последствия выявленных проблем и тенденций	Выявлены основные проблемы и тенденции развития кадрового потенциала научно-технической сферы; оценено состояние и перспективы кадрового потенциала научно-технической сферы в России; предложены меры по улучшению кадрового потенциала научно-технической сферы

Исходя из анализа существующих методов и подходов к научно-техническим направлениям, можно выделить несколько нерешенных проблем:

Автоматизированные инструменты для сбора, анализа и интерпретации данных: интеллектуальная система может включать различные модули для сбора данных из разных источников, их обработки и анализа. Например, система может использовать методы машинного обучения и обработки естественного языка для извлечения информации из научных публикаций и других научно-технических ресурсов. Это позволит эффективно агрегировать и интерпретировать данные, выявлять закономерности и тенденции, а также предоставлять релевантную информацию для принятия решений.

Отсутствие интеграции различных типов данных: для полного и объективного анализа научно-технического потенциала необходимо учитывать не только публикации и патенты, но и другие факторы, такие как финансирование исследований, сотрудничество с индустрией, наличие технологических инноваций и др. Необходимо разработать методологию и инструменты для интеграции и анализа различных типов данных.

Оценка и прогнозирование научно-технического потенциала: интеллектуальная система может включать модели и методы оценки, учитывающие широкий спектр факторов, включая качество и количество публикаций, инновационную активность, сотрудничество с индустрией и другие параметры. Система может использовать статистические методы, анализ сетей, прогнозирование и другие подходы для оценки текущего научно-технического потенциала и предсказания его развития в будущем.

На основе этих нерешенных проблем, можно предложить свое решение в виде разработки интеллектуальной системы поддержки принятия решений для автоматизации научно-технических направлений.

Заключение

В данной работе был проведен обзор существующих методов, подходов и технологий в области оценки актуальности и потенциала научно-технических направлений. Были рассмотрены основные критерии и показатели для оценки актуальности и потенциала научно-технических направлений, а также основные источники информации для этой цели.

Предложена классификация методов, подходов и технологий по различным признакам, таким как тип источника информации, уровень анализа, степень формализации, степень участия экспертов и т.д. Были проанализированы преимущества и недостатки различных методов, подходов и технологий, а также их применимость и ограничения для разных целей и контекстов. Выявлены перспективные направления для дальнейшего развития и усовершенствования методов, подходов и технологий в области оценки актуальности и потенциала научно-технических направлений, такие как интеграция разных источников информации, использование машинного обучения и искусственного интеллекта, учет динамики и неопределенности научно-технического развития и т.д.

Работа предоставляет базу для дальнейших исследований и разработок в области научно-технических направлений и может служить основой для создания инновационных систем и инструментов, которые помогут исследователям и учреждениям эффективно управлять научными процессами и достигать своих целей.

Литература

1. Jones T. Research information management: A primer. Research Information Network // International Journal of Information Systems and Project Management. – 2016. – Vol. 3, No. 5. – P. 67–69.
2. Kanani A.M. Scientific research management system using web and mobile technologies / A.M. Kanani, A. Shinde // International Journal of Computer Science and Mobile Computing. – 2015. – Vol. 4, No. 9. – P. 138–147.
3. Martin-Sempere M.J. Information systems for research management: A review of the literature // Journal of Informetrics. – 2014. – Vol. 8, No. 4. – P. 917–956.
4. Shum S.B. Integrated research information management: From information provision to knowledge management / S.B. Shum, A. Bissett // Learned Publishing. – 2004. – Vol. 17, No. 3. – P. 211–223.
5. Timpka T. Knowledge management in collaborative research projects: Preliminary results from a literature review / T. Timpka, K. Henttonen // International Journal of Information Management. – 2005. – Vol. 25, No. 1. – P. 50–66.
6. Naumov S. Using Syntactic Text Analysis to Estimate Educational Tasks' Difficulty and Complexity / S. Naumov, V.S. Vykhovanets // Proceedings of the International Conference on Advanced Intelligent Systems and Informatics. – 2020. – Vol. 77, No. 2. – P. 159–178.
7. Glushkov A. Intelligent Decision Support System for Scientific and Technological Potential Assessment // International Journal of Intelligent Systems and Applications. – 2016. – Vol. 8, No. 1. – P. 32–34.
8. Levada A. Methodology for the Development of Science and Technology Development Strategy // Science and Innovations. – 2013. – Vol. 9, No. 3. – P. 105–108.
9. Gromyko A.A. Methodology for Forecasting the Development of Science and Technology // Science and Innovations. – 2012. – Vol. 8, No. 2. – P. 19–21.
10. Weißer Tim. A Clustering Approach for Topic Filtering within Systematic Literature Reviews / Tim Weißer, Till Saßmannshausen, Dennis Ohrndorf, Peter Burggräf, Johannes Wagner // Proceedings of the International Conference on Information Systems. – 2019. – Vol. 7, No. 3. – P. 59–64.
11. Moher D. Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA Statement / D. Moher, A. Liberati, J. Tetzlaff // PLOS Medicine. – 2006. – Vol. 6, No. 7. – P. 44–48.
12. Affonso Felipe. Analysis of the evolution of scientific collaboration networks for the prediction of new co-authorships / Felipe Affonso, Monique de Oliveira Santiago, Thiago Magela Rodrigues Dias // Scientometrics. – 2018. – Vol. 114, No. 1. – P. 78–83.
13. Bondarenko A. Methodology for Knowledge Extraction from Trained Artificial Neural Networks / A. Bondarenko, L. Aleksejeva // Information Technology and Management Science. – 2019. – Vol. 21, No. 3. – P. 6–14.
14. Dias P.M. Extraction and Validation of Scientific Data for the Identification of Publications / Patrícia Mascarenhas Dias, Thiago Magela Rodrigues Dias, Gray Farias Moita, Adilson Luiz Pinto // International Journal of Information Systems and Project Management. – 2017. – Vol. 5, No. 1. – P. 31–33.

15. Lowe D.J. The effects of decision aid structural restrictiveness on cognitive load, perceived usefulness, and reuse intentions / D.J. Lowe, P.M. Reckers // *International Journal of Accounting Information Systems*. – 2018. – Vol. 28, No. 1. – P. 1–13.

16. Pedrosa I. Critical success factors for information systems projects: A systematic review and comparison between agile and traditional software development methodologies / I. Pedrosa, C.J. Costa // *International Journal of Information Systems and Project Management*. – 2019. – Vol. 7, No. 3. – P. 5–29.

17. Alles M. The use of CAATTs in auditing financial statements: Implications for auditing practice and education / M. Alles, G. Gray // *Journal of Accounting Education*. – 2016. – Vol. 36, No. 2. – P. 1–17.

18. Manita R. The impact of information technology on audit quality: A literature review / R. Manita, A. Berrada // *Journal of Accounting and Taxation*. – 2020. – Vol. 12, No. 1. – P. 1–17.

19. Glushkov A. Intelligent Decision Support System for Assessing Scientific and Technical Potential // *Proc. Intern. Conf. on Digital Technologies*. – 2013. – Vol. 50, No. 1. – P. 191–197.

20. Chizhov D.A. Automation of information technologies for managing scientific research activities of an organization // *Information Technology and Management Science*. – 2000. – Vol. 4, No. 1. – P. 47–50.

21. Barsukova M.N. Automation of the process of forming reports on scientific research activities in the university / M.N. Barsukova, A.A. Romme // *New development impulses: scientific research issues*. – 2020. – Vol. 2, No. 7. – P. 11–16.

22. Chernysha A.E. Assessing the effectiveness of the scientific and technical potential of research organizations / A.E. Chernysha, N.I. Skrigana, N.N. Skrigana // *International Symposium «Intelligent Systems»*. – 2021. – Vol. 18, No. 4. – P. 210–216.

23. Fedoraeva S.V. Problems and trends in the development of the personnel potential of the scientific and technical sphere // *International Symposium «Intelligent Systems»*. – 2017. – Vol. 5, No. 2. – P. 32–37.

advantages and disadvantages. Particular attention is paid to methods based on the analysis of scientific publications, patents, citations, social networks and expert assessments. Promising directions for further development and improvement of methods for assessing the relevance and potential of scientific and technical areas are also considered. The basic requirements for automated research management systems are also specified and their efficiency and advantages are analyzed.

Keywords: scientific and technical areas, assessment of relevance, assessment of potential, data analysis, data management systems, scientific data, knowledge management, limitations of existing approaches.

DOI: 10.21293/1818-0442-2023-26-3-55-64

References

1. Jones T. [Research information management: A primer. Research Information Network.] *International Journal of Information Systems and Project Management*. 2016, vol. 3, no. 5, pp. 67–69.

2. Kanani A.M. [Scientific research management system using web and mobile technologies] *International Journal of Computer Science and Mobile Computing*. 2015, vol. 4, no. 9, pp. 138–147.

3. Martin-Sempere M.J. [Information systems for research management: A review of the literature] *Journal of Informetrics*. 2014, vol. 8, no. 4, pp. 917–956.

4. Shum S.B., A. Bissett [Integrated research information management: From information provision to knowledge management] *Learned Publishing*. 2004, vol. 17, no. 3, pp. 211–223.

5. Timpka T. [Knowledge management in collaborative research projects: Preliminary results from a literature review] *International Journal of Information Management*. 2005, vol. 25, no. 1, pp. 50–66.

6. Naumov S., Vykhoanets V.S. [Using Syntactic Text Analysis to Estimate Educational Tasks' Difficulty and Complexity] *Proceedings of the International Conference on Advanced Intelligent Systems and Informatics*. 2020, vol. 77, no. 2, pp. 159–178.

7. Glushkov A. [Intelligent Decision Support System for Scientific and Technological Potential Assessment] *International Journal of Intelligent Systems and Applications*. 2016, vol. 8, no. 1, pp. 32–34.

8. Levada A. [Methodology for the Development of Science and Technology Development Strategy] *Science and Innovations*. 2013, vol. 9, no. 3, pp. 105–108.

9. Gromyko A.A. [Methodology for Forecasting the Development of Science and Technology] *Science and Innovations*. 2012, vol. 8, no. 2, pp. 19–21.

10. Tim Weißer, Till Saßmannshausen, Dennis Ohrndorf, Peter Burggräf, Johannes Wagner [A Clustering Approach for Topic Filtering within Systematic Literature Reviews] *Proceedings of the International Conference on Information Systems*. 2019, vol. 7, no. 3, pp. 59–64.

11. Moher D., Liberati A., Tetzlaff J. [Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA Statement] *PLOS Medicine*. 2006, vol. 6, no. 7, pp. 44–48.

12. Felipe Affonso, Monique de Oliveira Santiago, Thiago Magela Rodrigues Dias [Analysis of the evolution of scientific collaboration networks for the prediction of new co-authorships] *Scientometrics*. 2018, vol. 114, no. 1, pp. 78–83.

13. Andrey Bondarenko, Ludmila Aleksejeva [Methodology for Knowledge Extraction from Trained Artificial Neural Networks] *Information Technology and Management Science*. 2019, vol. 21, no. 3, pp. 6–14.

14. Patrícia Mascarenhas Dias, Thiago Magela Rodrigues Dias, Gray Farias Moita, Adilson Luiz Pinto [Extraction and Validation of Scientific Data for the Identification of Publications]

Солиев Искандар Бегалиевич

Аспирант каф. физики и астрономии (ФА)
Национального исследовательского
Томского политехнического университета (НИ ТПУ)
Ленина пр-т, 30, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-952-178-81-33
Эл. почта: ibs2@tpu.ru

Савельев Алексей Олегович

Канд. техн. наук, доцент отд. информационных
технологий НИ ТПУ
Ленина пр-т, 30, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-909-540-63-78
Эл. почта: sava@tpu.ru

Soliev I.B., Savelev A.O.

Review of existing methods, approaches and technologies in assessing the relevance and potential of scientific and technical areas

Currently, there are many methods, approaches and technologies for assessing the relevance and potential of scientific and technical areas. This is an important task for the development of science and innovation, as well as for defining priorities and strategies for research funding. This paper provides a review of existing methods, approaches and technologies, as well as their

International Journal of Information Systems and Project Management. 2017, vol. 5, no. 1, pp. 31–33.

15. Lowe D.J., Reckers P.M. [The effects of decision aid structural restrictiveness on cognitive load, perceived usefulness, and reuse intentions] *International Journal of Accounting Information Systems*. 2018, vol. 28, no. 1, pp. 1–13.

16. Pedrosa I., Costa C.J. [Critical success factors for information systems projects: A systematic review and comparison between agile and traditional software development methodologies.] *International Journal of Information Systems and Project Management*. 2019, vol. 7, no. 3, pp. 5–29.

17. Alles M., Gray G. [The use of CAATTs in auditing financial statements: Implications for auditing practice and education.] *Journal of Accounting Education*. 2016, vol. 36, no. 2, pp. 1–17.

18. Manita R., Berrada A. [The impact of information technology on audit quality: A literature review] *Journal of Accounting and Taxation*. 2020, vol. 12, no. 1, pp. 1–17.

19. Glushkov A. [Intelligent Decision Support System for Assessing Scientific and Technical Potential] *Proceedings International Conference on Digital Technologies*. 2013, vol. 50, no. 1, pp. 191–197.

20. Chizhov D.A. [Automation of information technologies for managing scientific research activities of an organization] *Information Technology and Management Science*. 2000, vol. 4, no. 1, pp. 47–50.

21. Barsukova M.N., Romme A.A. [Automation of the process of forming reports on scientific research activities in the

university] *New Development Impulses: Scientific Research Issues*. 2020, vol. 2, no. 7, pp. 11–16.

22. Chernysh A.E., Skrigana N.N., Skrigana N.I. [Assessing the effectiveness of the scientific and technical potential of research organizations] *International Symposium «Intelligent Systems»*. 2021, vol. 18, no. 4, pp. 210–216.

23. Fedoraeva S.V. [Problems and trends in the development of the personnel potential of the scientific and technical sphere] *International Symposium «Intelligent Systems»*. 2017, vol. 5, no. 2, pp. 32–37.

Iskander B. Soliev

Postgraduate student, Department of Physics and Astronomy
Tomsk National Research Polytechnic University (NI TPU)
30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-952-178-81-33
Email: ibs2@tpu.ru

Aleksei O. Saveliev

Doctor of Science in Engineering, Assistant Professor,
Department of Information Technology NI TPU
30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-909-540-63-78
Email: sava@tpu.ru

УДК 004.056

А.А. Воробьева, М.Ю. Федосенко

Методы интеллектуального анализа данных и обработки естественного языка в управлении роботизированными производственными системами

Представлен сравнительный анализ методов обработки естественного языка и интеллектуального анализа данных, используемых при обработке данных в управлении роботизированными производственными системами. Разработана концепция реализации процесса интеграции методов интеллектуального анализа данных и обработки естественного языка в роботизированные производственные системы, описаны необходимые компоненты. Основная фокусировка сделана на использование методов обработки естественного языка (natural language processing). Материал работы имеет ценность для проведения экспериментальных исследований в области применения методов обработки естественного языка и искусственного интеллекта в роботизированных производственных системах.

Ключевые слова: умные фабрики, машинное обучение, большие данные, роботизированные производственные системы, обработка естественного языка, text mining, natural language processing, кибербезопасность.

DOI: 10.21293/1818-0442-2023-26-3-65-71

Современный уровень развития технологий искусственного интеллекта (ИИ) позволяет автоматизировать решение множества задач, таких как выявление закономерностей, принятие решений, цифровая имитация поведенческих характеристик. Однако их качественное решение требует применения эффективных алгоритмов обработки разнородных данных, полученных с различных производственных систем. Такие данные могут быть представлены в различных форматах, на различных языках, а также могут быть неструктурированными. Эти данные впоследствии используются для обучения моделей машинного обучения (МО), на основе которых строятся интеллектуальные системы управления.

Автоматизация ряда человеческих задач является необходимым условием для практической реализации современных робототехнических систем [1]. По данному направлению сегодня в научном сообществе ведется активная работа, большое число публикаций посвящено вопросам обработки данных с использованием методов ИИ и МО.

В данной работе выполнено сравнение существующих решений и научных публикаций в области обработки неструктурированных и слабоструктурированных данных, текстов на естественном языке (ЕЯ), методов обработки ЕЯ (англ. natural language processing, NLP). Представлены результаты анализа перспектив применения интеллектуального анализа текстов на ЕЯ для управления роботизированными системами производства.

Анализ основных направлений исследований в области роботизированных производственных систем

Сегодня одним из главных направлений развития робототехнических систем является создание технологий для умных фабрик (англ. smart factory). На таких фабриках методы ИИ и МО используются для анализа данных, управления автоматизированными процессами и самообучения. Здесь производ-

ственные системы действуют в значительной степени автономно, используя данные, поступающие в режиме реального времени.

Современная концепция «Индустрия 4.0» направлена именно на поддержку сбалансированного и/или симбиотического взаимодействия между людьми и машинами в производственной среде.

Предусмотрено использование киберфизических систем (КФС) и передовых технологий взаимодействия «человек–машина». При этом акцент делается именно на симбиозе человека и КФС, что должно обеспечивать синергетический эффект от взаимодействия. Концепция не подразумевает замены человека роботами и интеллектуальными системами. Основная её цель – обеспечить повышение эффективности и результативности работы операторов с помощью новейших технологий.

В научной работе [2] представлена концепция применения подхода интеграции знаний (англ. knowledge integration) на умной фабрике, где производственные системы могут автономно адаптироваться к событиям и действовать с учетом изменений в производстве, цепочке поставок и требований клиентов. Рассмотрена возможность интеграции знаний о предыдущем опыте в различные виды взаимодействия умной фабрики, такие как «человек–человек», «человек–машина» и «машина–машина».

Интеграция знаний рассмотрена с организационной, кадровой и технологической точек зрения как перспективный подход к управлению знаниями в «Индустрии 4.0». Основной идеей является преобразование качественных показателей знаний в количественные, что позволяет выполнять их обработку в системах ИИ.

Авторы предлагают использование цифровых двойников для объединения данных и имитационных моделей, что позволяет выполнять моделирование и прогнозирование в режиме реального времени. Данный подход обеспечивает возможность раннего обна-

ружения потенциальных проблем, а также более эффективное и надежное функционирование производственных систем, обеспечивая при этом высокую гибкость и адаптивность.

В статье [3] авторами представлено исследование в области использования так называемых софт-ботов (англ. *softbots*) в интеллектуальных производственных системах. Софт-бот представляет собой интеллектуального персонального помощника, представляющего оператору возможность взаимодействовать с интеллектуальным оборудованием, роботами, компьютерами и другими информационными системами, как человек с человеком. В работе предложена эталонная структура, которая позволяет создавать софт-ботов для заданных условий. Авторы отмечают, что разработанное решение является перспективным, однако имеет ряд ограничений, связанных с безопасностью, семантической интероперабельностью, обработкой голоса и распознаванием ЕЯ, адаптивностью.

В работе [4] выполнен систематический обзор литературы для определения перспективных направлений исследований и критических областей развития в области технологий для умных фабрик.

Авторами определено, что исследования могут быть сгруппированы в пять кластеров: радиочастотная идентификация (англ. *RFID*) для управления производством в режиме реального времени (отслеживание объектов, сбор производственных данных); беспроводные технологии (*RFID*, сенсорные сети и пр.) для функционирования, контроля и планирования процессов производства в режиме реального времени; мультиагентные системы, онтологии для контроля и планирования процессов, ускорения принятия решений; облачные вычисления; методы оптимизации, планирования и моделирования для снижения издержек производства.

Анализ представленных выше работ показал, что качественная интеграция перечисленных подходов способна вывести умные фабрики и роботизированные системы на новый уровень, минимизировав участие оператора. Эффективное использование приведенных технологий может быть обеспечено только в случае применения корректных процедур управления и обмена данными по всей цепочке поставок.

Такого рода обмен, в свою очередь, порождает риски информационной безопасности. Вопросы обеспечения безопасности на умных фабриках в настоящий момент остаются открытыми, доступно лишь ограниченное число публикаций по данной тематике.

Большинство проанализированных работ требуют интеграции знаний в умные фабрики и выделяют необходимость наличия релевантных данных, прошедших качественную предобработку. Выделены следующие перспективные методы работы с данными: облачные, туманные, граничные вычисления; описательная, предиктивная, предписывающая аналитика; графы знаний; анализ и генерация текста, обработка полуструктурированных и неструктурированных данных; использование цифровых двойников.

Методы предобработки данных для управления техническими изменениями в роботизированных производственных системах

Вопросы управления техническими изменениями (ТИ) являются особенно актуальными при производстве сложной продукции и изделий [5].

Работа [6] описывает применение интеллектуальных технологий для обработки информации прошлых ТИ, с акцентом на её важности для оптимизации процессов разработки текущих изменений и принятия решений. Авторы применяют метод обнаружения знаний в базах данных (*knowledge discovery in databases, KDD*) с целью оценить возможность его использования для решения задачи управления техническими изменениями.

В работе приведено описание эксперимента по анализу данных производства автомобилей, включающих более 50 тыс. предыдущих инженерных изменений за пять лет [7].

Также выполнено сравнение достоинств и недостатков более ранних подходов [8–11]. Ключевыми составляющими анализа текстовых данных является использование правил ассоциации, *KDD* и применение методологии по исследованию данных (англ. *Cross-industry standard process for data mining*). Полученные результаты формулируют необходимость оптимизации временных и вычислительных ресурсов путём сокращения количества атрибутов данных.

Подобные задачи также исследуются в работе [12], которая представляет объемное описание применения интеллектуальных методов анализа данных ТИ. Она содержит в себе исследование возможностей использования цепей Маркова для анализа и сравнения запросов на ТИ в промышленных комплексах, смоделированных при помощи матрицы структуры проектирования.

Эксперименты по обработке текстов запросов на ТИ проведены на данных проекта по разработке грузовых автомобилей компании *Volvo Group Trucks Technology*. Основной акцент работы сделан на анализе исторических данных доработок из базы данных с целью выявления закономерностей в аналитических моделях проектирования. Основные этапы процесса включают: выборку, подготовку данных, трансформацию, поиск ассоциативных связей, интерпретацию результатов. Схематически они представлены на рис. 1.

Методы обработки естественного языка в управлении техническими изменениями

Запросы на технические изменения представляют собой письменные тексты на ЕЯ, которыми обмениваются операторы процесса. Ключевым этапом процесса обнаружения знаний является применение технологий анализа данных и текста (англ. *data и text mining*) к документам на ТИ.

В работе [13] авторы описывают последовательное применение технологий обработки ЕЯ к данным ТИ проектов. Подход позволяет сократить время простоя из-за сбоев. Полученные формализованные знания также могут быть использованы в качестве основы для оптимизации производственных процессов.

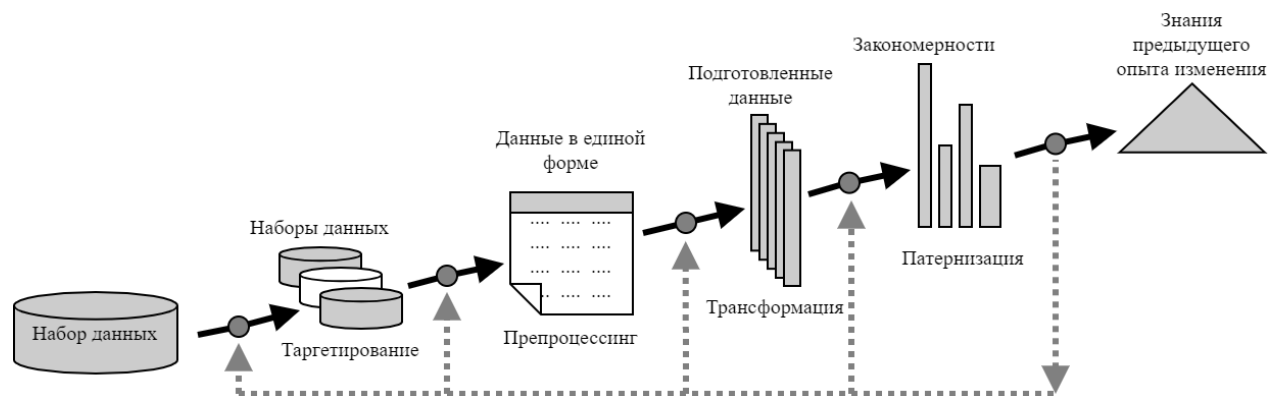


Рис. 1. Основные этапы процесса обнаружения знаний в text mining [12]

Конвейер обработки неструктурированных текстовых данных, поступающих от оборудования и операторов, включает: очистку и подготовку данных, токенизацию (разделение текста на токены), удаление стоп-слов, лемматизацию (приведение слов к нормальной морфологической форме), векторизацию (конвертация текста в числа) и статистический анализ (выделение математических закономерностей для последующего интеллектуального анализа). Для прогнозирования времени простоя оборудования на основе текстовых комментариев операторов станков в сочетании с данными оборудования производственных линий применяются алгоритмы XGBoost и LigthGBM в сочетании со следующими методами векторизации: Bag-of-Words, TF-IDF, Word2Vec. Наиболее высокая точность достигается с использованием LigthGBM и TF-IDF.

В работе [14] исследуется применение методов кластеризации текстов документов на ТИ, написанных на итальянском языке. Анализируемые тексты включали описания причин ТИ.

Для поиска связей между текстами документов на ТИ использовались нейронные сети, а именно алгоритм самоорганизующихся карт Кохонена (англ. SOM) [15]. На этапе предобработки предлагается использовать метод TF-IDF. Количество терминов, связанных с каждым документом в наборе данных после фильтрации и стемминга, было равно 361. Далее выполнялись кластеризация и визуализация посредством использования U-матриц. Результаты показали, что использование нейронных сетей SOM при поиске закономерностей и обработке текстов документов на ТИ является эффективным инструментом для улучшения процесса анализа ТИ. Также он позволяет решить проблему неконтролируемой кластеризации.

В рамках данного исследования проведен анализ достоинств и недостатков применения SOM в text mining, представленных в табл. 1.

Результаты анализа методов обработки ЕЯ в управлении техническими изменениями показали, что данные методы используются для бинарной (в случае с автоматизацией процесса принятия решения) и многоклассовой классификации (в случае определения категории технической доработки в автоматизированной системе). Помимо этого, применение методов NLP решает задачи анализа тональности

текста, выделения именованных сущностей (например, наименований и имен), извлечение из текста фактов и взаимоотношений между словами (отношение конкретных терминов к конкретным задачам автоматизации процессов).

Таблица 1

Характеристика самоорганизующихся карт Кохонена

№	Достоинства	Недостатки
1	Высокая скорость обучения	Работа только с вещественными числовыми векторами
2	Устойчивость к зашумленным данным	Требует явного указания количества кластеров
3	Визуализация многомерных данных	Отсутствие чётких границ кластеров, объективно существующие кластеры могут разрываться на фрагменты
4	Снижение размерности исходного пространства, проецирование многомерного пространства в пространство с более низкой размерностью	Сильная зависимость от инициализации (начального распределения весов)

Одной из наиболее важных задач NLP в рамках обеспечения эффективного производства и интеллектуального управления роботизированными системами производства является задача суммаризации-минимизации большого объёма текста с сохранением ключевой сути изложенной информации. Применение данного подхода позволяет анализировать большие объёмы технической документации и выделять из неё конкретный опыт, необходимый для улучшения систем.

На рис. 2 представлены подходы и приведена классификация задач обработки ЕЯ [16].

Интеллектуальные методы обеспечения функциональной и информационной безопасности в производственных системах

Помимо задач по организации интеллектуальных систем управления, роботизации и автоматизации производственных процессов, а также использования методов МО и обработки ЕЯ, важной задачей является обеспечение функциональной и информационной безопасности роботизированных систем.

В работе [17] изложены основные подходы к обеспечению информационной и функциональной безопасности микросетей, которые обладают потенциалом для автономной и отказоустойчивой работы в процессе их электрообеспечения. Автор приводит

описание наиболее значимых атак на КФС за последние 10 лет, делает выводы, что целью злоумышленников являются не сами микросети, а именно системы управления.



Рис. 2. Классификация задач обработки естественного языка [16]

Применение умных сетей электроснабжения (англ. smart grid) в настоящее время затруднено, так как вопросы обеспечения безопасности остаются нерешенными, существуют лишь отдельные частные решения. В качестве решения предлагается прежде всего отталкиваться от архитектуры сети и структуры системы управления, а также присущих ей уязвимостей, поскольку на данный момент обеспечение кибербезопасности не является встроенной функцией в микросетях.

В качестве универсальных методов защиты автор предлагает непрерывный мониторинг состояния, проактивные методы защиты, методы кодирования, использование интеллектуальных счётчиков состояния системы (IoT). Кроме того, авторы отмечают технологию блокчейн как перспективную для обеспечения безопасности киберфизических систем за счёт встроенных алгоритмов хеширования, смарт-контрактов и распределённого характера хранения и обработки данных [18].

Отметим, что решение задачи по обеспечению кибербезопасности в интеллектуальных производственных системах прежде всего заключается в использовании криптографических алгоритмов (в том числе легковесных) и интеллектуальных методов обнаружения и предотвращения классических атак с учётом имеющихся знаний об уязвимостях системы. Основным методом защиты от потери данных и обеспечения отказоустойчивости является резервирование,

на реализацию которого необходимо заложить определённое количество вычислительных мощностей на этапе проектирования. В целом в роботизированных производственных системах должна применяться концепция «secure by design», которая заключается в обеспечении безопасности на всех этапах производственного процесса – от этапа проектирования до финальной фазы поставки.

Стоит подчеркнуть, что в большинстве случаев атаки нацелены на системы управления и принятия решений, где часто используются технологии ИИ, что ведет к необходимости также учитывать и атаки, специфичные для систем ИИ: состязательные атаки, отравляющие атаки, атаки в обход, атаки уклонения и др. [19]. Исследования в данном направлении только начинаются, и в настоящий момент данный вид атак может быть отнесен к наиболее опасным, так как не существует общепринятых методов противодействия.

Необходимые технологии в виде инструментов и алгоритмов МО, необходимых для решения задач разработки систем, представлены в табл. 2.

На рис. 3 представлена сравнительная характеристика системы в контексте моделирования на VAD-диаграмме. Данная диаграмма отражает цели, направления и подходы, необходимые при сборе требований и последующей разработке интеллектуальных роботизированных систем управления.

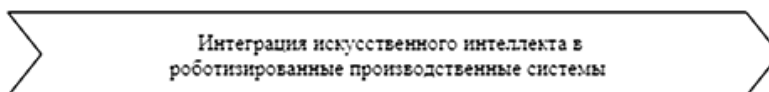
Таблица 2

Подходы, методы и инструменты для интеллектуального управления роботизированными производственными системами

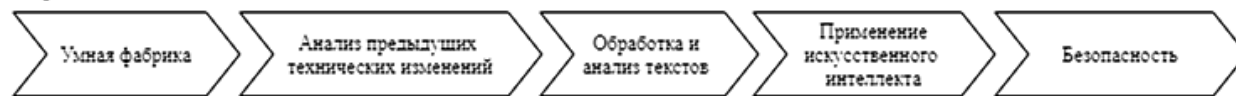
№	Подход	Инструменты
1	2	3
1	Вычисления	–
1.1	Облачные	IaaS, SaaS, PaaS, FaaS, CaaS
1.2	Туманные	OpenFog, IFCIoT
1.3	Граничные	AR, VR, SCADA, PAC, IoT
2	Аналитика	Описательная, предиктивная, предписывающая аналитика
3	Предобработка естественного языка	–
3.1	Векторизация	Подходы: TF-IDF, Bag-of-Words, Word2Vec, регулярные выражения, One-hot encoding. Библиотеки: Keras, NLTK, YouTokenToMe

1	2	3
3.2	Лематизация	Библиотеки: <i>Mystem, Stemka, Treetagger, UDPipe, Wordnet Lemmatizer, Metaphraz, Coda, Cadenza</i>
3.3	Стемминг	Подходы: анализ n-грамм, стемминг на основе корпуса текстов, стохастические алгоритмы, аффикс-стеммеры, <i>kipple-down rules</i> , стеммер Портера
3.4	Статистический анализ текстов	Эмбедингу, <i>Scoring, TF-IDF, Word2Vec</i> , регулярные выражения
4	Графы знаний	Подходы и библиотеки: онтологии, матричная факторизация, <i>Random Walk, DeepWalk, Node2vec, DNNGR, SDNE</i>
5	Машинное обучение	–
5.1	Классификация	Методы: наивный Байесовский классификатор, деревья решений, логистическая регрессия, k-ближайших соседей, метод опорных векторов, нейронные сети. Библиотеки: <i>NumPy, SciPy, Matplotlib, Seaborn, Scikit-learn, Pandas, TensorFlow, Theano, Keras, PyTorch, Matplotlib</i>
5.2	Регрессия	Методы: линейная регрессия, полиномиальная регрессия
5.3	Кластеризация	Методы: k-средних, сови́г среднего значения, DBSCAN, SOM. Библиотеки: <i>PyCaret, PyClustering, NumPy, Pandas, Scikit-learn, Matplotlib</i>
6	Правила ассоциации	Подходы: <i>Generalized Association Rules, Quantitative Association Rules, Apriori, DHP, Partition, DIC</i>
7	Корреляция	Подходы: множественная корреляция, КПК Пирсона, КПК Спирмена, ККЗ Фехнера, критерий Стьюдента
8	Обнаружение знаний в базах данных	Методы и подходы: деревья решений, нейронные сети, генетические алгоритмы, методы статистического анализа (дескриптивный, регрессионный, корреляционный, факторный, дисперсионный, компонентный, дискриминантный)
9	Методы обработки естественного языка	Инструменты и библиотеки: <i>AlchemyAPI, Expert System S.p.A., General Architecture for Text Engineering (GATE), Modular Audio Recognition Framework, MontyLingua, Natural Language Toolkit (NLTK)</i>
10	Информационная и функциональная безопасность	–
10.1	Управление уязвимостями	Банки данных угроз и уязвимостей: <i>CWE, CVE, OWASP, ФСТЭК БДУ</i>
10.2	Автоматизация контроля кибератак (технологии противодействия)	Инструменты: <i>SIEM, SOAR, EDR, UEBA, NGFW, SOC</i> , сканеры уязвимостей, <i>IDS/IPS</i>
10.3	Кодирование и криптография	Код Хемминга, блочное шифрование, асимметричное шифрование, хеширование, ГОСТ 28147-89 и пр.
10.4	Резервирование	<i>Backup, Snapshot, PBBA target systems, PBBA integrated systems, VRRP, Ethernet-channel</i>

Цель



Направления



Подходы

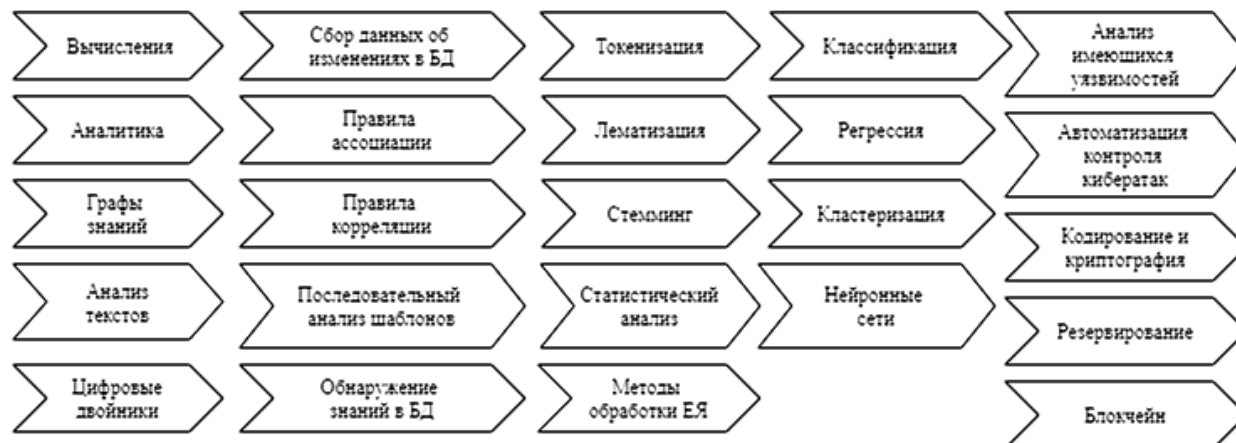


Рис. 3. VAD-диаграмма интеллектуального управления роботизированными системами производства

Заключение

В статье представлены обзор и анализ научно-технической литературы в области методов интеллектуального анализа данных и обработки естественного языка в управлении роботизированными производственными системами. Рассмотрены особенности применения данных методов на умных фабриках и при управлении техническими изменениями. Одной из основных составляющих данного процесса является анализ предыдущего опыта.

В силу большого объёма данных (в том числе слабо- и неструктурированных) анализ целесообразно выполнять при помощи методов искусственного интеллекта. Акцент сделан на методах обработки естественного языка (токенизации, лематизации, стемминга, статического анализа текстовых данных). Однако необходимо учитывать вычислительно-ресурсные возможности системы и подходы по оптимизации их использования. Наиболее применимыми подходами под задачи интеллектуального управления роботизированными системами являются облачные, туманные и граничные вычисления.

Важнейшей задачей является обеспечение кибер- и функциональной безопасности роботизированных производственных систем, а именно систем управления и принятия решений. Её решение прежде всего заключается в использовании криптографических методов, а также интеллектуальных методов противодействия атакам с учётом имеющихся знаний об уязвимостях. Основным методом защиты от потери данных и обеспечения отказоустойчивости является резервирование. При проектировании роботизированных систем и интеллектуальных методов управления рекомендуются использование предиктивной и предписывающей аналитики, а также реализация идеологии «secure by design».

Представленная в работе концепция интеграции методов интеллектуального управления в роботизированные производственные системы может служить основой для выбора различных подходов, методов и технологий интеллектуального анализа данных и обработки естественного языка для управления роботизированными производственными системами.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, № 2019-0898.

Литература

1. How natural language processing helps manufacturing sector? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.analyticsinsight.net/how-natural-language-processing-helps-manufacturing-sector/>, свободный (дата обращения: 01.11.2022).
2. Knowledge Integration in Smart Factories / J. Zenkert, C. Weber, M. Dornhöfer, H. Abu-Rasheed, M. Fath // *Encyclopedia*. – 2021. – Vol. 1, No. 3. – P. 792–811.
3. Rabelo R.J. Softbots supporting the operator 4.0 at smart factory environments / R.J. Rabelo, D. Romero, S.P. Zambiasi // *IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems*. – 2018. – P. 456–464.
4. Literature review on the ‘Smart Factory’ concept using bibliometric tools / F. Strozzi, C. Colicchia, A. Creazza, C. Noè // *International journal of production research*. – 2017. – Vol. 55, No. 22. – P. 6572–6591.

5. What is an engineering change request (ECR)? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.arena-solutions.com/resources/articles/engineering-change-request/> (дата обращения: 01.11.2022).
6. Wickel M.C. How to integrate information about past engineering changes in new change processes? / M.C. Wickel, U. Lindemann // *Proceedings of the 20th International Conference on Engineering Design (ICED 15)*. – 2015. – Vol. 3. – P. 229–238.
7. Sharafi A. Knowledge discovery in databases. – Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013. – P. 51–108.
8. A posteriori design change analysis for complex engineering projects [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://asmedigitalcollection.asme.org/mechanicaldesign/article-abstract/133/10/101005/467343/A-Posteriori-Design-Change-Analysis-for-Complex>, свободный (дата обращения: 02.11.2023).
9. Change propagation analysis in complex technical systems [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://asmedigitalcollection.asme.org/mechanicaldesign/article-abstract/131/8/081001/466974/Change-Propagation-Analysis-in-Complex-Technical>, свободный (дата обращения: 02.11.2023).
10. Modeling engineering change management process in virtual collaborative design environments [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://spectrum.library.concordia.ca/id/eprint/9094/>, свободный (дата обращения: 02.11.2023).
11. Knowledge-based methods for evaluation of engineering changes [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/handle/2027.42/78926/mehtacr_1.pdf?sequence=1, свободный (дата обращения: 02.11.2023).
12. Amarrsson I.O. Systematic Analysis of Engineering Change Request Data: Applying Data Mining Tools to Gain New Fact-Based Insights. – Sweden, Goeteborg: Chalmers Tekniska Hogskola, 2020. – 80 p.
13. Natural Language Processing for Manufacturing Industry [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.stridelysolutions.com/resources/blog/natural-language-processing-for-manufacturing-industry/>, свободный (дата обращения: 01.11.2022).
14. Grieco A. On the application of text clustering in engineering change process / A. Grieco, M. Pacella, M. Blaco // *Procedia Cirp*. – 2017. – Vol. 62. – P. 187–192.
15. T. Kohonen Self-Organizing Maps // *Artificial Neural Networks*. – New York, 2001. – 501 p.
16. DEVOPEDIA for developers by developers [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://devopedia.org/images/article/187>, свободный (дата обращения: 01.11.2022).
17. Canaan B. Microgrid cyber-security: Review and challenges toward resilience [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/16/5649>, свободный (дата обращения: 01.11.2023).
18. Gimenez-Aguilar M. Achieving cybersecurity in blockchain-based systems: A survey / M. Gimenez-Aguilar, J.M. de Fuentes, L. Gonzalez-Manzano, D. Arroyo // *Future Generation Computer Systems*. – 2021. – Vol. 124. – P. 91–118.
19. Adversarial attacks on machine learning cybersecurity defences in industrial control systems / E. Anthi, L. Williams, M. Rhode, P. Burnap, A. Wedgbury // *Journal of Information Security and Applications*. – 2021. – Vol. 58. – P. 102717.
20. Вигерс К. Разработка требований к программному обеспечению / К. Вигерс, Д. Битти. – М.: Русская редакция, 2004. – 576 с.
21. Wickel M.C. A retrospective analysis of engineering change orders to identify potential for future improvements / M.C. Wickel, U. Lindemann // *Proceedings of NordDesign*. – 2014. – P. 692–701.

Воробьева Алиса Андреевна

Канд. техн. наук, доцент фак. безопасности информационных технологий (ФБИТ) Национального исследовательского университета ИТМО (Университет ИТМО) Кронверкский пр-т, 49, А, г. Санкт-Петербург, Россия, 197101
ORCID: 0000-0001-6691-6167
Тел.: +7-921-947-21-14
Эл. почта: vorobeva@itmo.ru

Федосенко Максим Юрьевич

Аспирант ФБИТ Университета ИТМО Кронверкский пр-т, 49, А, г. Санкт-Петербург, Россия, 197101
ORCID: 0000-0001-8786-5661
Тел.: +7-921-751-41-52
Эл. почта: fedosenkomaksim98@gmail.com

Vorobeva A.A., Fedosenko M.Y.

Methods for data mining and natural language processing in the management of robotic production systems

The paper presents a comparative analysis of natural language processing and data mining methods used in data processing in the industrial robotic systems. A concept for implementing the process of integrating artificial intelligence methods into production management systems has been developed, and the necessary components have been described. The focus is on the use of natural language processing methods. The work could be useful for conducting experimental research in the field of application of natural language processing and artificial intelligence methods in robotic production systems.

Keywords: smart factories, machine learning, big data, robotic production systems, natural language processing, text mining, natural language processing, cybersecurity.

DOI: 10.21293/1818-0442-2023-26-3-65-71

References

1. *How natural language processing helps manufacturing sector?* Available at: <https://www.analyticsinsight.net/how-natural-language-processing-helps-manufacturing-sector/>, free (Accessed: November 01.11.2022).
2. Zenkert J., Weber C., Dornhöfer M., Abu-Rasheed H., Fath M. Knowledge Integration in Smart Factories, *Encyclopedia*, 2021, vol. 1, no. 3, pp. 792–811.
3. Rabelo R.J., Romero D., Zambiasi S.P. Softbots supporting the operator 4.0 at smart factory environments, *IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems*, 2018, pp. 456–464.
4. Strozzi F., Colicchia C., Creazza A., Noè C. Literature review on the ‘Smart Factory’ concept using bibliometric tools, *International Journal of Production Research*, 2017, vol. 55, no. 22, pp. 6572–6591.
5. *What is an engineering change request (ECR)?* Available at: <https://www.arenasolutions.com/resources/articles/engineering-change-request/>, free (Accessed: November 01.11.2022).
6. Wickel M.C., Lindemann U. How to integrate information about past engineering changes in new change processes? *Proceedings of the 20th International Conference on Engineering Design (ICED 15)*, 2015, vol. 3, pp. 229–238.
7. Sharafi A. Knowledge discovery in databases. *Springer Fachmedien Wiesbaden*, 2013, pp. 51–108.
8. *A posteriori design change analysis for complex engineering projects.* Available at: <https://asmedigitalcollection.asme.org/mechanicaldesign/article-abstract/133/10/101005/>

467343/A-Posteriori-Design-Change-Analysis-for-Complex, free (Accessed: 02.11.2023).

9. *Change propagation analysis in complex technical systems.* Available at: <https://asmedigitalcollection.asme.org/mechanicaldesign/article-abstract/131/8/081001/466974/Change-Propagation-Analysis-in-Complex-Technical>, free (Accessed: 02.11.2023).

10. *Modeling engineering change management process in virtual collaborative design environments.* Available at: <https://spectrum.library.concordia.ca/id/eprint/9094/>, free (Accessed: 02.11.2023).

11. *Knowledge-based methods for evaluation of engineering changes.* Available at: https://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/handle/2027.42/78926/mehtacr_1.pdf?sequence=1, free (Accessed: 02.11.2023).

12. Arnarsson I.O. *Systematic Analysis of Engineering Change Request Data: Applying Data Mining Tools to Gain New Fact-Based Insights.* Sweden, Goteborg, Chalmers Tekniska Hogskola, 2020. 80 p.

13. *Natural Language Processing for Manufacturing Industry.* Available at: <https://www.stridelysolutions.com/resources/blog/natural-language-processing-for-manufacturing-industry>, free (Accessed: 01.11.2022).

14. Grieco A., Pacella M., Blaco M. On the application of text clustering in engineering change process, *Procedia CIRP*, 2017, vol. 62, pp. 187–192.

15. Kohonen T. *Self-Organizing Maps, Artificial Neural Networks (Third Extended Edition)*, New York, 2001, 501 p.

16. *DEVOPEDIA for developers. by developers.* Available at: <https://devopedia.org/images/article/187/4433.1560446395.png>, free (Accessed: 01.11.2022).

17. *Microgrid cyber-security: Review and challenges toward resilience.* Available at: <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/16/5649>, free (Accessed: 01.11.2023).

18. Gimenez-Aguilar M., de Fuentes J.M., Gonzalez-Manzano L., Arroyo D. Achieving cybersecurity in blockchain-based systems: A survey, *Future Generation Computer Systems*, 2021, vol. 124, pp. 91–118.

19. Anthi E., Williams L., Rhode M., Burnap P., Wedgbury A. Adversarial attacks on machine learning cybersecurity defenses in industrial control systems, *Journal of Information Security and Applications*, 2021, vol. 58, P. 102717.

20. Wieggers K., Beatty J. *Software requirements, Pearson Education*, 2013, 576 p.

21. Wickel M.C., Lindemann U. A retrospective analysis of engineering change orders to identify potential for future improvements, *Proceedings of NordDesign*, 2014, pp. 692–701.

Alisa A. Vorobeva

Candidate of Sciences in Engineering, Associate professor, Faculty of Secure Information Technologies ITMO University 49 bldg. A, Kronverksky pr., St. Petersburg, Russia, 197101
ORCID: 0000-0001-6691-6167
Phone: +7-921-947-21-14
Email: vorobeva@itmo.ru

Maksim Yu. Fedosenko

Postgraduate student, Faculty of Secure Information Technologies ITMO University 49 bldg. A, Kronverksky pr., St. Petersburg, Russia, 197101
ORCID: 0000-0001-8786-5661
Phone: +7-921-751-41-52
Email: fedosenkomaksim98@gmail.com

УДК 004.932: 623.746

М.Ю. Катаев, Е.Ю. Карташов, П.П. Гейко

Обнаружение лесных пожаров по изображениям, полученным с БПЛА

Лесные пожары представляют собой серьезный природный риск, вызывающий экономические потери, гибель людей и значительный ущерб окружающей среде. Во всем мире проводятся исследования по разработке методов и устройств для обнаружения и последующего мониторинга лесных пожаров. Для решения этих задач наиболее распространенными являются системы дистанционного обнаружения и мониторинга пожаров как наземного (подвижные или стационарные), воздушного (беспилотные летательные аппараты, самолеты и вертолеты), так и спутникового базирования. Эти системы обладают высокой эффективностью сбора данных и обнаружения пожаров, но ограничены относительно небольшими территориями. В реальности лесные пожары могут охватывать большие территории, в результате чего известные подходы мало пригодны для оптимального пространственного покрытия. Перспективным путем решения этой проблемы является использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), оказавшихся эффективными благодаря своей маневренности, позволяющей реализовать дистанционное получение информации в любом направлении, выбор стратегии построения маршрута полета и т.д. Таким образом, они представляют недорогую альтернативу известным подходам для обнаружения и мониторинга в реальном времени территории лесного пожара. В данной статье рассматривается методика раннего обнаружения лесных пожаров на основе обработки изображений, полученных с борта беспилотного моторного планера (БПМП), алгоритмами компьютерного зрения. Маршрут БПМП, выполняющего мониторинг по маршруту (круговому или эллиптическому), может быть составлен таким образом, чтобы регулярно можно было получать оперативную информацию о большой по площади территории. При этом, время полета БПМП может составлять от одного до нескольких часов с постоянной передачей полученных изображений в центр обработки, и тем самым появляется возможность извлечения информации об обнаружении лесного пожара на ранней стадии его возникновения, принятия оперативных мер и впоследствии контроля за его распространением.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, лесные пожары, изображение, методы обработки, анализ изображения.

DOI: 10.21293/1818-0442-2023-26-3-72-79

В работе фокусируется внимание на способах контроля за локализацией области возникновения и распространения лесных пожаров, являющихся стихийным бедствием [1, 2]. Лесной пожар – неконтролируемый, он распространяется под влиянием ветра, состояния погоды, а также типа и состояния растительного покрова и чаще всего встречаются в дикой природе или в районе сельскохозяйственных земель. В отличие от других стихийных бедствий, лесные пожары часто обусловлены действиями людей и климатических изменений, связанных с устойчивыми периодами высокой температуры без дождей.

С каждым годом наблюдается тенденция к увеличению возникновения лесных пожаров и ущерба, который они причиняют жизни и имуществу. Возникающее во время пожара большое количество дыма в воздухе загрязняет окружающее пространство, с которым сложно бороться из-за высокого уровня токсичности.

Учитывая масштабы потерь с точки зрения социально-демографических и социально-экономических последствий лесных пожаров, необходимо инвестировать значительные средства, время и усилия на проведение работ для раннего выявления и контроля пространственно-временной динамики лесных пожаров. В статье проводится краткий обзор БПЛА, используемых для обнаружения лесных пожаров, и предложена методика для мониторинга больших территорий с помощью беспилотного моторного планера (БПМП).

На рис. 1 приведены два варианта обнаружения лесных пожаров с помощью цифровых камер, установленных на борту беспилотных летательных аппаратов. Из рис. 1 видно, что специфика обнаружения пожара и задымления существенно отличается, так как при направлении видения камеры на горизонт (см. рис. 1, а) небо является существенным ограничением в поиске задымления за счет существенно большей яркости. В то же время при наблюдении с БПЛА в направлении к поверхности земли (см. рис. 1, б) небо не является помехой для наблюдения дыма и огня.

Поиск и безопасное обнаружение лесных пожаров могут иметь конкретный набор целей, которые должны быть достигнуты и имеют количественный набор показателей, связанных с полученными результатами. Можно выделить следующие цели: а) подготовка условий для обнаружения лесного пожара; б) обнаружение и локализация лесного пожара; в) моделирование распространения лесного пожара; г) мониторинг развития пожара; д) выделение и развертывание пожарных служб для тушения пожара. Степень пожарной опасности участков леса определяется на основе «Шкалы оценки лесных участков по степени опасности возникновения в них пожаров». По площади, охваченной огнем, лесные пожары подразделяются на 6 классов: загорание – 0,2–0,1 га; малый пожар – 0,2–2,0 га; небольшой пожар – 2,1–20 га; средний пожар – 21–200 га; крупный пожар – 201–2000 га; катастрофический пожар – более 2000 га [3].

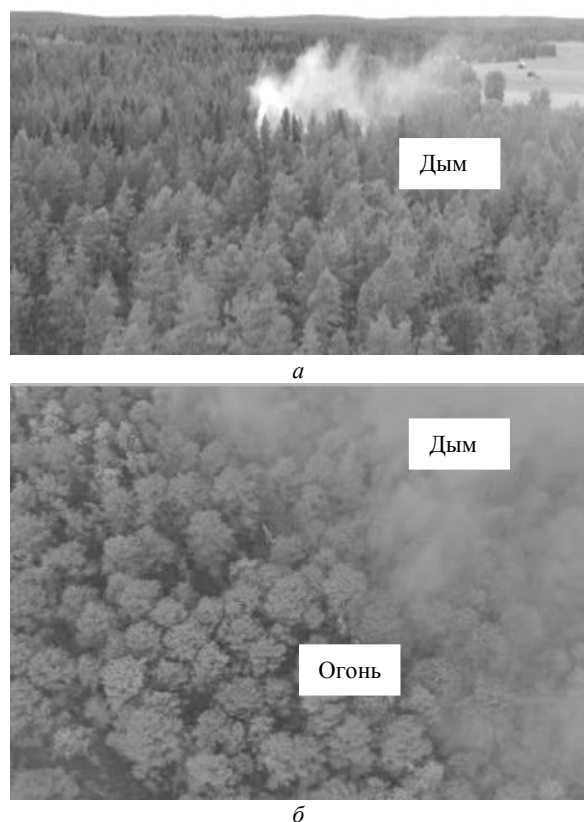


Рис. 1. Изображения разных лесных пожаров, полученных с помощью цифровых камер, установленных на борту БПЛА: *а* – направление на горизонт; *б* – направление к поверхности земли

Два ключевых элемента важны в усилиях по уменьшению воздействия лесных пожаров на территорию: 1) промежуток времени между обнаружением пожара и появлением пожарных необходимо свести к минимуму, что уменьшает вероятность распространения пожара, и 2) оценка серьезности события и мониторинг ситуации, связанной с развитием пожара. По этим причинам важно иметь надежные и эффективные системы раннего обнаружения и мониторинга пожара.

Основная функция подготовки условий для обнаружения лесного пожара связана с эффективным и рациональным своевременным исследованием системы дорог, лесного ландшафта, географического расположения населенных пунктов, погодных условий и т.д. Это направление достаточно обширно в решаемых задачах, однако в данной статье ограничимся, главным образом, подробным описанием мониторинга, который выполняется с использованием методов на основе БПЛА.

Современные подходы обнаружения и мониторинга лесных пожаров можно разбить на группы: а) наземные системы (датчики, установленные на вышках, пешеходные); б) пилотируемые воздушные системы на базе транспортных средств; в) системы на основе спутников; г) системы на базе БПЛА. Кратко коснемся ограничений подходов, которые могут быть использованы в системах обнаружения и мониторинга лесных пожаров. Наземные измерения ограни-

чены пространственным диапазоном и не подходят для очень больших территорий. Пилотируемые летательные аппараты (самолеты, вертолеты) дорогие в эксплуатации, не могут быть использованы для регулярного мониторинга.

Измерительные приборы, установленные на спутниковых аппаратах, (например, MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer [4]), VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite [5]), способны обнаруживать лесные пожары [6, 7] в любой точке мира, получая изображения несколько раз в день. Однако пространственное разрешение этих приборов достаточно низкое: 250–500 м на пиксель, а это означает, что пожары могут быть обнаружены, если их размер превышает половину пикселя.

Существуют спутники с более высоким пространственным разрешением (3–30 м), пролетающие над одной и той же точкой с периодичностью в несколько дней, что не подходит для задач мониторинга пожаров. Кроме того, наличие облачности или густого дыма затрудняет детектирование лесных пожаров. Спутниковые системы с их нерегулярным временным и пространственным разрешением не могут быть в итоге применены для мониторинга обстановки, необходимой для тушения лесных пожаров. Тем не менее в России создана информационная система дистанционного мониторинга Федерального агентства лесного хозяйства (блок мониторинга пожарной опасности [8]), которая позволяет получать определенную географическую и статистическую информацию о пожарах на территории России. Однако от времени получения информации со спутника до ее отражения в программной системе проходит задержка, что не позволяет ее использовать для оперативной работы.

БПЛА с системами дистанционного зондирования на основе компьютерного зрения становится все более реалистичным вариантом, обеспечивающим быстрый, мобильный и недорогой способ обнаружения и мониторинга лесных пожаров. Именно использование БПЛА является перспективным решением для мониторинга больших площадей лесов, позволяющим захватить изображения с высоким пространственным разрешением и их трансляцией в командный центр на земле.

Во время тушения пожара БПЛА могут предоставлять для анализа качественную визуальную информацию о месте пожара даже при слабом освещении и сильном задымлении. Однако время облета БПЛА некоторой территории является достаточно большим (несколько часов), несмотря на высокую скорость ввиду ограниченных ресурсов для полета, что требует усидчивости и внимательности операторов. Во время бедствий, таких как лесные пожары, оператору важно определить пространственные области, где интенсивность или масштабы бедствия наибольшие. Прежде всего, это: а) определение мест, где интенсивность огня является наибольшей, б) направление распространения огня, в) область задымления и другие факторы, которые имеют решающее значение для локализации контура пожара.

Одними из развитых подходов оценки ситуации, связанной с лесными пожарами, являются визуальные системы, когда на БПЛА ставится цифровая камера, изображения которой транслируются на командный пункт. Однако есть проблемы с визуализацией изучаемой оператором территории, связанные с неравномерностью освещения (время дня, направление полета БПЛА относительно положения солнца и т.д.), низкой скоростью передачи изображений (задержки), а также низким качеством (скорость передачи зависит от качества изображения или числа пикселей по сторонам изображения $\{N_x, N_y\}$) и контрастом снятых изображений.

Использование алгоритмов обнаружения пожара и дыма на основе методов компьютерного зрения, предложенных в работе [9], привело к тому, что стало фиксироваться большее количество пожаров. При этом разработанные подходы (VFD – Video-based fire detection) можно использовать для обнаружения присутствия огня и дыма на ранней стадии, когда их площадь небольшая (как по территории, так и видимой части на изображении в пикселях). Большинство используемых алгоритмов обработки изображений основано на анализе информации о движении, цвете, энергии в потоке кадров видео [10, 11].

Алгоритмы на основе анализа цвета являются наиболее распространенными на практике и используют цветовое пространство RGB, YUV, HSI или HSV [12, 13].

Система обнаружения пожаров по изображениям, полученным с помощью БПЛА

Дистанционное зондирование с помощью беспилотных воздушных систем дает множество преимуществ по сравнению с другими видами мониторинга в плане скорости получения информации. Высокая маневренность БПЛА позволяет им исследовать регион по определенному маршруту, широкий спектр датчиков, которые могут быть загружены на борт, позволяет собирать важные данные для анализа ситуации на исследуемой территории. Для решения задач мониторинга существует широкий выбор типов БПЛА, начиная от больших БПЛА с длительным временем полета, массой полезной нагрузки до небольших БПЛА с коротким временем полета и ограниченными возможностями полезной нагрузки [14].

Отметим, что практически все БПЛА имеют в стандартной полезной нагрузке цифровые камеры, используемые для поиска пожаров в виде дыма и/или огня. Кроме того, применяются и инфракрасные датчики яркостной температуры, позволяющие фиксировать положение нагретых тел в пространстве, но они менее популярны. Используемые системы навигации на борту БПЛА позволяют в режиме мониторинга обеспечивать географическую локализацию БПЛА в реальном времени, что позволяет привязывать захваченные камерой изображения и таким образом проводить картографирование пожаров.

Пожары имеют определенные параметры, такие как температура, мерцание, движение, яркость, дым и газовый состав [15]. Эти параметры можно изме-

рить с помощью различных приборов. Визуальные и инфракрасные (ИК) камеры БПЛА чаще всего применяются для сбора большого количества информации о лесном пожаре.

Для лесного пожара температура может превышать $1000\text{ }^\circ\text{C}$, что приводит к пиковому излучению в средневолновом инфракрасном диапазоне (3–5 мкм) [16]. Однако если БПЛА находится вблизи такого пожара, эта температура может быть зафиксирована, а если присутствует дым, ветер не в направлении БПЛА, фиксация пожара тепловыми датчиками осложняется. В этом плане цифровые камеры видимого диапазона спектра являются широко доступными и используются в различных приложениях, в том числе и для поиска пожаров.

Нами предполагается, что одиночные БПЛА, управляемые человеком, являются полезными для мониторинга различных по площади территорий на основе предлагаемой методики. Автоматизация обнаружения и мониторинга пожаров может помочь обеспечить оптимальное по времени обнаружение зоны возгорания.

Предлагаемая методика основана на использовании беспилотного моторного планера (БМПП), который тратит энергию двигателя только на подъем на нужную высоту, после чего переходит в режим планирования, и потом на поддержание полета в воздушном потоке. Схема вариантов мониторинга по такой схеме представлена на рис. 2.

Предлагается для мониторинга применять круговую или эллиптическую траекторию полета БМПП, когда цифровая камера может быть направлена в направлении горизонта под углом β (см. рис. 2, а) или внутрь траектории полета (см. рис. 2, б). В принципе на БПЛА или БМПП может быть установлено одновременно две камеры, которые будут обеспечивать широкий диапазон контролируемой лесной территории в зависимости от высоты полета H .

Качество обнаружения пожара зависит также и от размера матрицы цифровой камеры (W_x, W_y) и угла обзора α , что для высоты полета БПЛА определяет пространственное разрешение (см/пиксель).

Ширину зоны обзора (W_x, W_y) на поверхности для каждого i -го изображения, возникающего по траектории полета в направлении к поверхности земли (см. рис. 2), можно оценить по формулам

$$\begin{aligned} W_x &= 2 \cdot H \cdot \text{tg}(\alpha/2), \\ W_y &= 2 \cdot H \cdot \text{tg}(\alpha/2), \end{aligned} \quad (1)$$

где H – высота полета, α – поле зрения камеры, (W_x, W_y) – количество пикселей изображения по горизонтали и вертикали.

Исходя из геометрических соображений (см. рис. 2), можно оценить среднюю дальность наблюдения территории R_c как расстояние от центра круговой траектории до центра изображения

$$R_c = H \cdot \text{tg}(\beta). \quad (2)$$

Анализ результатов табл. 1 показывает, что поле зрения камеры при различных наклонах к горизонту может составлять от 0,6 до 6 км. Конечно же, при большом угле наклона камеры реальная площадь

видения будет больше, однако там и чувствительность контроля будет меньше.

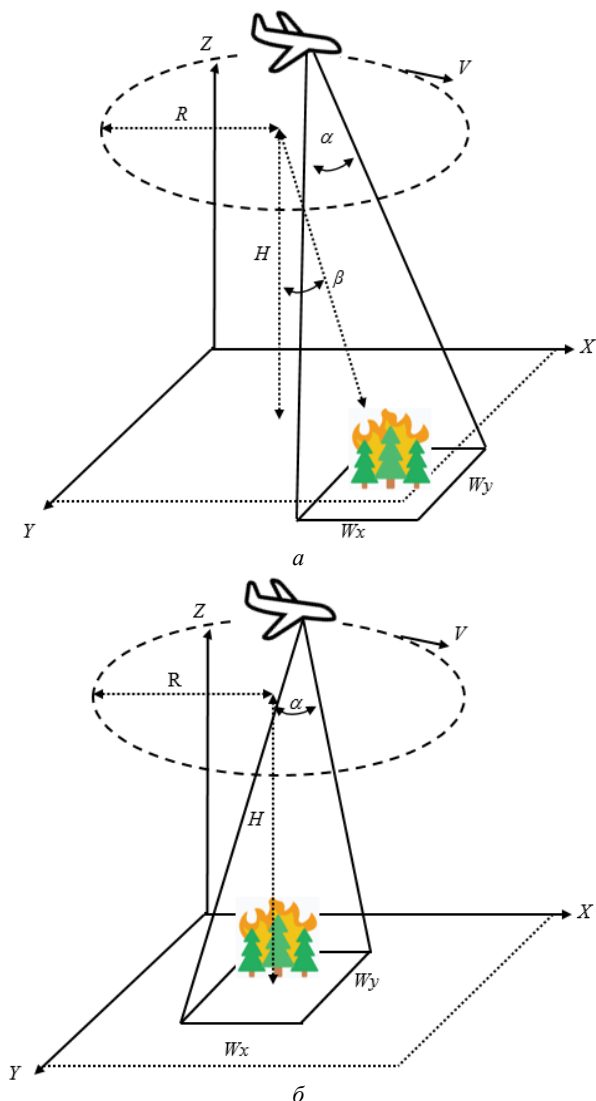


Рис. 2. Схемы использования беспилотного моторного планера для обнаружения пожара: а – направление на горизонт; б – направление к поверхности земли

Можно оценить площадь, которая будет просматриваться при полете БПМПП с данной высоты и угла наклона камеры β . Учитывая формулу площади окружности, можно рассчитать контролируемую изображениями площадь (см. рис. 2). Округляя до целых значения табл. 1, рассчитаем контролируемую площадь с различных высот и различных углов наклона цифровой камеры.

Таблица 1
Расстояние R_c (м) для различных углов наклона камеры β

H (м) / β (град)	50°	60°	70°	80°
500	596	866	1374	2836
750	894	1299	2060	4253
1000	1192	1732	2747	5671

Анализ результатов табл. 2 показывает, что контролируемая площадь беспилотным летательным аппаратом при полете по круговой траектории в течение

нескольких часов может составлять от 20 до 200 км². Эта площадь зависит от угла наклона камеры к горизонту. Зная радиус круговой траектории, можно оценить длину окружности: $C = 2 \cdot \pi \cdot R$ (R – радиус круговой траектории) и рассчитать время облета одного круга.

Таблица 2
Контролируемая площадь S (км²) для различных R_c (согласно табл. 1) для радиуса R круговой траектории 3, 5 и 7 км

R/R_c (км)	1	2	3	4
3	21,9	50,2	84,8	125,6
5	34,6	75,4	122,6	175,9
7	47,2	100,6	160,3	226,2

Анализируя результаты табл. 3, можно отметить, что увеличение контролируемой площади введет к росту времени облета БПМПП круговой траектории, т.е. время возвращения в ту же точку может составить от 30 мин при скорости полета 40 км/ч до 2 ч для скорости 20 км/ч. Для радиуса круговой траектории 3 км время меняется от одного часа до 30 мин при различных скоростях, и специалисты могут выбирать соответствующий режим контроля.

Таблица 3
Время облета (ч) для радиуса R круговой траектории 3, 5 и 7 км и разной скорости полета БПМПП

V (км/ч) / R (км)	3	5	7
20	0,94	1,57	2,19
30	0,63	1,05	1,47
40	0,47	0,79	1,1

Методики обнаружения пожара по RGB-изображению

Предлагаемая методика контроля территории лесного массива и обнаружения пожара основывается на получении цветных изображений по траектории полета БПЛА (см. рис. 2). Каждое изображение представляет собой набор трех матриц, соответствующих каналам {R – красный, G – зеленый и B – синий} [13]. Так как траектория полета БПМПП является круговой, то относительно солнца часть изображений будет более темной, чем другие. Поскольку в работе применяются пороговые по яркости алгоритмы поиска дыма и пожара, предварительно каждое изображение приводится к однородному с помощью линейных преобразований:

$$\begin{aligned} Rm(x, y) &= AR \cdot R(x, y) + BR, \\ Gm(x, y) &= AG \cdot G(x, y) + BG, \\ Bm(x, y) &= AB \cdot B(x, y) + BB. \end{aligned}$$

Здесь R, G, B – яркость каналов каждого пиксела с координатами (x, y) , AR, BR, AG, BG, AB, BB – искомые коэффициенты.

Для всех последующих изображений коэффициенты AR, BR, AG, BG, AB, BB являются неизменными, что делает их близкими по средней яркости. После коррекции яркости каждая матрица, соответствующая каналам RGB, разбивается на одинаковые блоки размером 10×10 пикселей, каждый из которых анализируется на наличие огня и дыма. Для анализа

применяются пороговые алгоритмы, где пороги определяются экспериментально по гистограммам яркости (рис. 3 и 4) в каждом блоке. Для каждой гистограммы находится максимум гистограммы яркости канала.

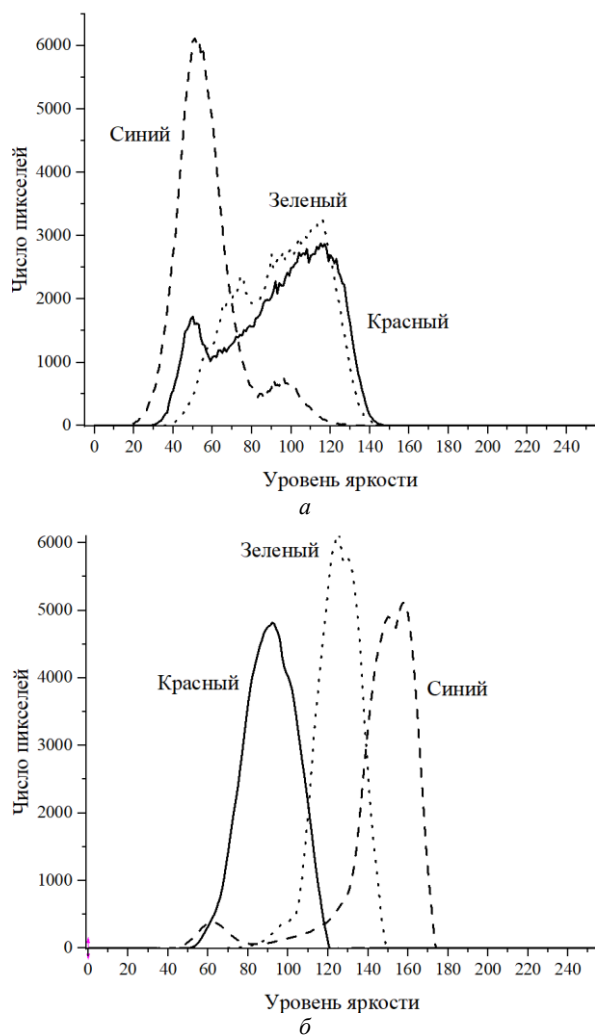


Рис. 3. Гистограммы RGB-каналов изображений, полученных по направлению к поверхности земли, представленных на рис. 1, *а*: *а* – только лес; *б* – лес и дым

Из рисунков видно, что гистограммы яркости только для леса существенно отличаются от гистограмм распределения яркости изображения леса в присутствии дыма. Это позволяет построить надежные критерии выделения участков леса, где присутствует дым. Проведение численных расчетов гистограмм (см. рис. 3 и 4) позволяет определить средние характеристики порогов, которые уже будут применяться на практике обнаружения областей изображений, наиболее подходящих под пожар.

Если такие блоки обнаружены, то по номеру изображения фиксируется направление на пожар и происходит определение его области [17] как номера блока в строке блоков. Дальнейшие действия предпринимает оператор БПЛА, и, они могут быть связаны с изменением маршрута полета или выдачей команды на определенные оперативные действия или др.

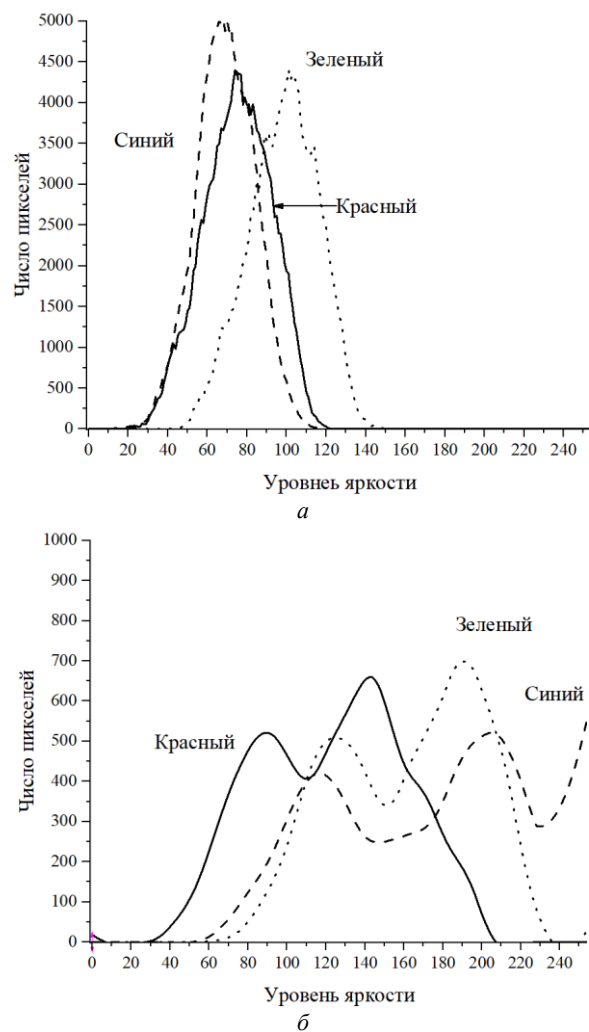


Рис. 4. Гистограммы RGB-каналов изображений, полученных в направлении горизонт, представленных на рис. 1, *б*: *а* – только лес; *б* – лес и дым

Одним из самых распространенных методов обнаружения огня является цветовая RGB-сегментация изображения порогами алгоритмом. Возможно применение и других цветовых пространств, например, YCbCr, HSI, CIELAB, YUV и др. [12, 13]. Алгоритм поиска пожара на изображении основан на последовательном переборе всех блоков изображения, начиная от левого верхнего края изображения. Для каждого блока строятся гистограммы и находятся их максимумы, которые сравниваются с некоторым заранее рассчитанным порогом. Превышение порога говорит о наличии лесного пожара в данном блоке изображения, а все другие значения говорят об отсутствии пожара.

Для обнаружения огня пожара на любом изображении находят значение красного цвета в максимуме гистограммы (см. рис. 4, *б*), и оно должно быть больше по сравнению с зеленым, а значение зеленого больше значений синего канала. Тогда получается правило, которое позволяет идентифицировать часть леса, где присутствует пожар (дым, как минимум), для которого верно $R > G > B$. Также компонента R

должна быть больше, чем среднее значение компоненты R_{mean} для того же блока изображения, что определяет правило $R > R_{mean}$. Если использовать цветовое пространство $YCbCr$, тогда пиксели считаются пожаром (огнем), если их значения соответствуют тому, что в любом изображении огня значение красного цвета в пикселе больше, чем зеленый, а зеленый больше, чем синий. Поскольку центр области возгорания при высокой температуре имеет белый цвет и для него уменьшается красная и увеличивается синяя компоненты по отношению к другим участкам пламени, это приводит к правилу $Cb > Y > Cr$. Другое правило заключается в том, что компонента Cr меньше стандартного отклонения для того же блока изображения δ , умноженного на некоторую постоянную k , что дает правило $Cr < k \cdot \delta$, где k определяется экспериментальным путем.

Преобразование значений пикселей RGB в цветовое пространство HSV позволяет выделить пиксели огня в виде правила $0 \leq H \leq 60$, $0,2 \leq S \leq 1$, $100 \leq V \leq 255$. Это определяет простой и эффективный алгоритм обнаружения пожара на изображении.

Блок, где присутствуют дым и лес, обнаруживается, если выполняется правило $B > G > R$.

Другой подход обнаружения пожара при наличии дыма сочетает в себе канал насыщенности цвета HSV и цвета RGB. Согласно этому подходу, обнаружение пожара связано с выполнением двух правил:

- 1) $R < G < B$;
- 2) $S \geq ((255 - R) \cdot \text{порог})$.

Для того чтобы эти правила срабатывали, необходимо, чтобы горизонт, который имеет очень высокую яркость по отношению к поверхности, был предварительно удален с изображения на стадии предварительной обработки. Для реализации этого подхода требуется определение двух пороговых значений порог1 и порог2 (примерные значения порогов найдены в виде диапазонов порог1 = (115–135) и порог2 = (55–65)). Занятые дымом области изображения могут быть найдены из правила в цветовом пространстве YUV:

- 1) $Y > \text{порог1}$;
- 2) $|U - 128| < \text{порог2}$;
- 3) $|V - 128| < \text{порог3}$,

где Y , U и V – значения яркости каждого пикселя изображения. Пороговые значения порог1, порог2 и порог3 определяются экспериментально.

Заключение

В статье предлагается подход по использованию БПЛА для обнаружения пожаров, позволяющий проводить мониторинг по круговой траектории в течение нескольких часов (4, 5). Основой подхода являются результаты работы [19]. Кроме того, данная статья является развитием, так как предлагаются варианты наблюдения за территорией, один из которых связан с наклоном цифровой камеры по направлению на горизонт, а другой – при наклоне камеры перпендикулярно к поверхности земли. Приведены расчеты возможной обнаруживаемой площади и времени пожара в зависимости от различных условий наблюдения.

Предложены методики обнаружения огня и дыма пожара, основанные на различных цветовых пространствах.

Литература

1. Арцыбашев Е.С. Лесные пожары и борьба с ними / Е.С. Арцыбашев. – М.: Лесная промышленность, 1974. – 152 с.
2. Щербов Б.Л. Лесные пожары и их последствия / Б.Л. Щербов, Е.В. Лазарева, И.С. Журкова. – Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2015. – 154 с.
3. Инструкция по авиационной охране лесов. – М.: Федеральная служба лесного хозяйства России. – 94 с.
4. MODIS [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://modis.gsfc.nasa.gov>, свободный (дата обращения: 13.11.2023).
5. VIIRS [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ncc.nesdis.noaa.gov/viirs>, свободный (дата обращения: 13.11.2023).
6. Афонин С.В. Система космомониторинга лесных пожаров на территории Томской области / С.В. Афонин, В.В. Белов // Оптика атмосферы и океана. – 2001. – Т. 14, № 8. – С. 692–696.
7. Ершов Д.В. Российская система спутникового мониторинга лесных пожаров / Д.В. Ершов, Г.Н. Коровин, Е.А. Лупян, А.А. Мазуров, С.А. Тащилин // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2004. – Т. 1, № 1. – С. 47–57.
8. ИСДМ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://nffc.aviales.ru/main_pages/index.shtml, свободный (дата обращения: 13.11.2023).
9. Коршунов Н.А. Борьба с лесными пожарами: информационное обеспечение с помощью авиационных средств // Пожарная безопасность. – 2008. – № 1. – С. 125–129.
10. Доррер Г.А. Динамика лесных пожаров / Г.А. Доррер. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. – 404 с.
11. Ahmad I. A fast adaptive motion estimation algorithm / I. Ahmad, W. Zheng, J. Luo, M. Liou // IEEE Transactions on CSVT. – 2006. – No. 3. – P. 420–438.
12. Bi Z. Color space conversion algorithm and comparison study / Z. Bi, P. Cao // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1976. – P. 012008. DOI:10.1088/1742-6596/1976/1/012008.
13. Шапиро Л. Компьютерное зрение / Л. Шапиро, Дж. Стокман. – М.: Бином. Лаборатория знаний, 2006. – 752 с.
14. Классификация БПЛА и системах интеллектуального управления / С.И. Федоров, А.В. Хаустов, Т.М. Крамаренко, В.С. Долгих // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – 2016. – № 74. – С. 12–21.
15. Бобков С.А. Физико-химические основы развития и тушения пожаров / С.А. Бобков, А.В. Бабуринов, П.В. Комраков. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2014. – 210 с.
16. Конев Э.В. Физические основы горения растительных материалов. – Новосибирск: Наука СО, 1977. – 240 с.
17. Васюков В.Н. Алгоритмы анализа изображений для системы раннего обнаружения лесных пожаров / В.Н. Васюков, А.Ю. Зайцева // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2014. – № 4 (25). – С. 57–69.
18. Мандель И.Д. Кластерный анализ. – М.: Финансы и статистика, 1988. – 176 с.
19. Kataev M. Yu. Computer vision method for forest fires detection based on RGB images obtained by unmanned motor glider / M. Yu. Kataev, E. Yu. Kartashov // Light & Engineering 2021. – Vol. 29, No. 5(2). – P. 71–78

Катаев Михаил Юрьевич

Д-р техн. наук, проф. каф. автоматизированных систем управления (АСУ) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 70-15-36, +7-960-975-27-85
Эл. почта: kmy@asu.tusur.ru

Карташов Евгений Юрьевич

Канд. техн. наук, доцент каф. машин и аппаратов химических и атомных производств Северского технологического института Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» Коммунистический пр-т, 65, г. Северск, Россия, 636036
Тел.: (382-3) 78-02-40, +7-905-991-66-92
Эл. почта: kart.62@yandex.ru

Гейко Павел Пантелеевич

Д-р физ.-мат. наук, вед. науч. сотр. Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, проф. каф. оптико-электронных систем и дистанционного зондирования (ОЭСИДЗ) Национального исследовательского Томского государственного университета (НИ ТГУ) Академический пр-т, 10/3, г. Томск, Россия, 634055
Тел.: +7 (382-2) 41-38-87, +7-905-991-9762
Эл. почта: ppg11@yandex.ru

Kataev M.Yu., Kartashov E.Yu., Geiko P.P.

Forest fires detection based on image processing obtained using UAV

Forest fires represent a serious natural risk causing economic losses, loss of life and significant environmental damage. In different countries of the world, including in Russia, research has been carried out to develop solutions for the detection and subsequent monitoring of forest fires. The most common ones are remote fire detection and monitoring systems, both ground-based (mobile or stationary), airborne (airplanes and helicopters), and satellite-based ones. These systems are highly efficient in data collection and fire detection, but for small areas. However, wildfires can cover large areas, making known approaches unsuitable for optimal spatial coverage. To overcome this limitation, unmanned aerial vehicles (UAVs) are proposed, that have proven to be useful due to their maneuverability, allowing the implementation of remote information acquisition in any direction, the flight route planning strategies, etc. Ultimately, they provide a low-cost alternative to established approaches for real-time detection and monitoring of wildfire areas. This article discusses a technique for early detection of forest fires based on UAV image processing, which is based on the previous works of the authors. The technique involves the use of computer vision algorithms for processing images received from an unmanned motor glider (UMG). The UMG route (for example, circular or elliptical) can be designed in such a way that it is possible to regularly receive information about a large area. The flight time of the UMG can be up to several hours. When transmitting the received images to the processing center, it becomes possible to extract information about the detection of a forest fire and subsequently control its spread.

Keywords: unmanned aerial vehicles, forest fires, image, processing technique.

DOI: 10.21293/1818-0442-2023-26-3-72-79

References

1. Artsybashev E.S. *Forest fires and fighting them*. Moscow, Timber Industry, 1974, 152 p. (in Russ.).
2. Shcherbov B.L., Lazareva E.V., Zhurkova I.S. *Forest fires and their consequences*. Novosibirsk, Academic Publishing House «Geo», 2015. 154 p. (in Russ.).
3. *Instructions for aviation protection of forests*. Moscow, Federal Forestry Service of Russia, 2015. 94 p. (in Russ.).
4. MODIS Available at: <https://modis.gsfc.nasa.gov>, free (Accessed: November 13, 2023).
5. VIIRS Available at: <https://ncc.nesdis.noaa.gov/viirs>, free (Accessed: November 13, 2023).
6. Afonin S.V., Belov V.V. Space monitoring system for forest fires in the Tomsk region. *Optics of the Atmosphere and Ocean*. 2001, vol. 14, no. 8, pp. 692–696 (in Russ.).
7. Ershov D.V., Korovin G.N., Lupyay E.A., Mazurov A.A., Tashchilin S.A. Russian system of satellite monitoring of forest fires, *Modern Problems of Remote sensing of the Earth from Space*. 2004, vol. 1, no. 1, pp. 47–57 (in Russ.).
8. ISDM Available at: https://nffc.aviales.ru/main_pages/index.shtml, free (Accessed: November 13, 2023) (in Russ.).
9. Korshunov N.A. Fighting forest fires: information support using aviation means. *Fire Safety*, 2008, no. 1, pp. 125–129 (in Russ.).
10. Dorrer G.A. *Dynamics of forest fires*. Novosibirsk, Publishing House SB RAS, 2008. 404 p. (in Russ.).
11. Ahmad I., Zheng W., Luo J., Liou M. A fast adaptive motion estimation algorithm. *IEEE Transactions on CSVT*, 2006, no. 3, pp. 420–438.
12. Bi Z., Cao P. Color space conversion algorithm and comparison study. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 1976, 012008. DOI:10.1088/1742-6596/1976/1/012008.
13. Shapiro L., Stockman J. *Computer vision*. Moscow, Binom, Knowledge Laboratory, 2006, 752 p. (in Russ.).
14. Fedorov S.I., Khaustov A.V., Kramarenko T.M., Dolgikh V.S. Classification of UAVs and intelligent control systems. *Open Information and Computer Integrated Technologies*, 2016, no. 74, pp. 12–21 (in Russ.).
15. Bobkov S.A., Baburin A.V., Komrakov P.V. *Physico-chemical foundations for the development and extinguishing of fires*. Moscow, Academy of State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2014, 210 p. (in Russ.).
16. Konev E.V. *Physical principles of combustion of plant materials*. Novosibirsk. Nauka SO, 1977, 240 p. (in Russ.).
17. Vasyukov V.N., Zaitseva A.Yu. Image analysis algorithms for early detection of forest fires. *Reports of the Academy of Sciences of Higher School of the Russian Federation*, 2014, no. 4 (25), pp. 57–69 (in Russ.).
18. Mandel I.D. *Cluster analysis*. Moscow, Finance and Statistics, 1988, 176 p. (in Russ.).
19. Kataev M.Yu., Kartashov E.Yu. Computer vision method for forest fires detection based on RGB images obtained by unmanned motor glider. *Light & Engineering*. 2021, vol. 29, no. 5(2), pp. 71–78 (in Russ.).

Mikhail Yu. Kataev

Doctor of Science in Engineering, Professor, Department of Automated Control Systems (ACS), Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR) 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 70-15-36, +7-960-975-27-85
Email: kmy@asu.tusur.ru

Evgeny Yu. Kartashov

Candidate of Sciences in Engineering, Associate Professor,
Department of Machines and Devices of Chemical and Nuclear
Production, Seversk Technological Institute, National Research
Nuclear University «MEPhI»

65, Kommunistichesky pr., Seversk, Russia, 636036

Phone: +7 (382-3) 78-02-40, +7-905-991-66-92

Email: kart.62@yandex.ru

Pavel P. Geiko

Doctor of Science in Physics and Mathematics, Professor,
Leading researcher, Institute of monitoring climatic and
ecological systems SB RAS, Department optoelectronic
systems and remote sensing (OESiRS),

National Research Tomsk State University

10, Akademichesky pr., Tomsk, Russia, 634055

Phone: +7 (382-2) 41-38-87, +7-905-991-97-62

Email: ppg11@yandex.ru

СООБЩЕНИЯ

УДК 621.396.9

А.Ф. Носов

Применимость систем передачи данных с использованием технологии LoRaWAN

Представлен обзор существующих и перспективных применений систем передачи данных с использованием технологии LoRaWAN. В ходе исследования рассматриваются варианты применения в различных отраслях, даётся оценка перспективных ниш применения на основе достоинств и ограничений технологии. Результатом проведённого исследования является аналитический обзор текущих и перспективных ниш для применения систем с использованием технологии LoRaWAN.

Ключевые слова: связь, передача данных, протокол, решение, LoRaWAN.

DOI: 10.21293/1818-0442-2023-26-3-83-88

Развитие и удешевление технологий интернета вещей (IoT) и технологий межмашинного взаимодействия (M2M) открывают перспективы автоматизации различных процессов. LPWAN (Low Power Wide Area Network) сети соответствуют требованиям IoT, таким как низкая стоимость, эффективность использования энергии источника питания, широкая зона покрытия, лёгкое развёртывание и простота масштабирования. LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) сети получили широкое применение среди сетей LPWAN благодаря возможности построения сетей разного уровня с открытым стандартом в нелицензируемом (в большинстве стран) диапазоне частот.

Технология LoRaWAN – технология, предназначенная для низкоскоростной беспроводной передачи данных от оконечных устройств с батарейным питанием в местных, региональных, национальных или глобальных сетях и удовлетворяющих ключевым требованиям IoT, таким как двунаправленная связь, сквозная безопасность, услуги по мобильности и геолокации [1]. Состоит из двух связанных подтехнологий: LoRa и LoRaWAN, где LoRa – это используемая радиотехнология для связи оконечного устройства и шлюза (условный аналог базовой станции в сотовой сети связи), LoRaWAN – протокол канального уровня для связи шлюза с сетевым сервером и серверами приложений.

Оконечное устройство имеют прямую радиосвязь со шлюзом. В случае нескольких шлюзов, оконечное устройство выбирает шлюз с лучшим сигналом. Шлюзы подключены к сетевому серверу посредством IP-соединения (Ethernet, WiFi, 3G/LTE, «WiFi-моста», радиорелейной линии), обеспечивают «прозрачное» подключение оконечных устройств. От сетевого сервера данные пересылаются к серверу приложений.

Данная технология описана неоднократно [2, 3] и имеет следующие основные преимущества: 1) максимальная практическая дальность канала связи в сложных условиях 1...4 км (заявленная до 15 км); 2) использование нелицензируемых в России диапазонов частот 864–865 и 868,7–869,2 МГц; 3) наибольшая заявленная скорость передачи данных 50 кбит/с (при ширине канала связи 500 кГц). Обычно исполь-

зуемая скорость – 5 кбит/с (при ширине канала связи 125 кГц); 4) возможность использования нескольких шлюзов для улучшения радиопокрытия; 5) малые массогабаритные характеристики передатчика (рис. 1); 6) низкая мощность передатчика (менее 25 мВт) и возможность длительной работы от «батарейки»; 7) возможность шифрования данных на уровне сети и приложения с помощью ключей (при необходимости); 8) возможность использования геолокации посредством использования временных меток шлюзов (при необходимости).

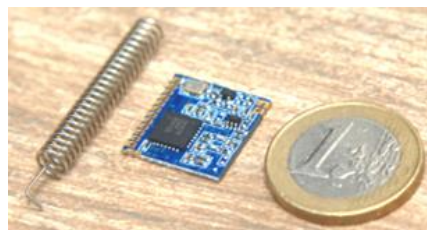


Рис. 1. Один из вариантов передатчика с антенной (монета – для понимания размеров устройства)

Основные ограничения: 1) задержка передаваемого сигнала из-за низкой скорости и особенностей модуляции радиосигнала; 2) технология модуляции радиосигнала ограничена в использовании патентом компании Semtech.

История применения

История коммерческого применения этой технологии началась в 2015 г., когда фирма Senet развернула сеть в Силиконовой долине установкой 50 мачт с площадью покрытия сети более 39 000 км² для учета расхода пропана и другого топлива систем отопления, а также развития технологии IoT [4].

В России технология применялась в первые годы только крупными игроками и большей частью в интересах энергосбытовых компаний для дистанционной передачи показаний счётчиков промышленных и частных потребителей энергии.

«Эр-Телеком» развернул сети передачи данных с технологией LoRaWAN более чем в 62 городах России (во всех городах с населением более 300 тыс. чел. в 2018 г.) и предоставляет услуги сторонним организациям, владея и эксплуатируя сами сети передачи данных [5].

Другой крупный оператор – «LagTech» – развернул сети в 20 регионах России [6].

Он предоставляет различные услуги, в том числе для компании «Читаэнергосбыт» с 2016 г., и развернул сеть из 152 шлюзов для обслуживания более 60 тыс. устройств [7]. Среди его клиентов «Мособлэнерго» с 2018 г. с более чем 33 тыс. устройств [8] и «Иркутская электросетевая компания» с 2019 г. и с более чем 35 тыс. счётчиков [9].

Несмотря на развёрнутые сети, компании других секторов экономики поначалу осторожно относились к применению данной технологии, считая, что технология передачи показаний счётчиков и участие в управлении технологическими процессами – вещи мало совместимые. Несмотря на стереотип в области применения, данная технология может быть пригодна в различных областях промышленности с учётом своих ограничений.

Управление технологическими процессами

Не все компании раскрывают используемые управляющие технологии, и это осложняет поиск объектов применения.

Самый крупный оператор LoRaWAN в России – «Эр-телеком» – применяет данную технологию с 2019 г. для компании «Россети Урал» в целях «сквозной автоматизации бизнес-процессов передачи электроэнергии до потребителя в распределительных сетях 0,4–110 кВ при обеспечении заданных параметров надежности, безопасности и экономической эффективности» [10], включая телеуправление реклоузерами и коммутационными аппаратами трансформаторных подстанций. Компания «Россети Урал» отметила, что «датчики позволяют решить не только вопрос противопожарной и физической безопасности, но и обеспечить телемеханизацию, телеуправление и учет электроэнергии». Также появляется «возможность сокращения операционных затрат, затрат на горюче-смазочные материалы, повышения производительности труда и снижения потерь электрической энергии» [11].

В том же 2019 г. «Газпромнефть информационно-технологический оператор» начал тестировать с «ЭР-Телеком» LoRaWAN с целью его внедрения на своих объектах. «Газпромнефть» отмечает, что «строит цифровую нефтяную компанию, управляемую на основе данных и “цифровых двойников”. Нижний слой данных – прежде всего с месторождений – очень сложно поднять и доставить до разработчиков, а технология LoRaWAN может это сделать, причем весьма эффективно...» [12].

Применение в секторе добычи углеводородов России расширяется. Другая из применивших данную технологию российских компаний – «Татнефть» – оборудовала более 90 скважин датчиками, интегрированными в АСУ ТП только в одном нефтегазодобывающем управлении «Елховнефть» [13].

Лидером применения в России в секторе переработки углеводородов пока остаётся «Сибур» с более 3000 различных датчиков на девяти предприятиях [14].

Один из известных примеров применения в крупном географическом проекте в области контроля

технологических устройств и передачи данных телеметрии – компания «General Electric» (GE). GE реализовала систему удаленного мониторинга более 1600 газотурбинных установок (ГТУ). «При эксплуатации таких сложных и дорогостоящих агрегатов необходимо минимизировать число внеплановых остановок и обеспечить своевременное получение данных о техническом состоянии установок. Система GE собирает данные о работе турбин, дальше информация поступает в центр обработки, затем специалисты компании принимают решения о целесообразности дальнейшей эксплуатации турбин. Преимуществом является оперативное реагирование на возникающие неполадки» [15].

Оптимизация режимов работы крупной строительной техники

Контроль за работой в случае крупной строительной техники позволяет не только экономить на её эксплуатации, но и оценить общее использование имеющегося парка оборудования и необходимость каждой единицы техники на площадке на разных этапах проведения работ. Имеющиеся примеры [16, 17] успешного внедрения данной технологии позволяют контролировать в том числе: 1) фактическое количество отработанного техникой времени (это позволит проводить ТО по фактически отработанным моточасам и соответственно снижать эксплуатационные затраты); 2) фиксацию фактов длительной работы «вхолостую» (при длительном перерыве в использовании, необходимо глушить двигатель для экономии его ресурса и экономии расхода топлива); 3) фиксацию фактов использования техники за пределами установленного рабочего времени (предотвращает использование техники не в целях производства работ); 4) уровень топлива и технических жидкостей (своевременное пополнение позволяет продлить ресурс, индицирует возможные неисправности и снижает вероятность незапланированных ремонтов); 5) фиксацию маршрута передвижения.

К сожалению, в России пока не известны примеры работы подобных сервисных компаний.

Экологический мониторинг

Разнообразие датчиков позволяет развернуть сеть постов мониторинга экологической безопасности промышленных объектов. Централизованно собирать данные с этих постов поможет обсуждаемая технология. Появляется возможность простого соединения постов экологического мониторинга для контроля экологической обстановки, выбросов и стоков.

Геолокация, логистика, транспорт

Возможность передавать данные местоположения от ГЛОНАСС/GPS трекера позволяет фиксировать посещение сотрудниками всех необходимых объектов, отслеживать маршруты передвижения техники.

Также появляется возможность отслеживания условий транспортировки и хранения чувствительных и опасных материалов и продукции (отслеживание фактов падения, нарушения температурно-влажностного режима, нахождения опасного и чувствительного груза вне мест его хранения).

Возможен и оперативный контроль количества материальных активов на складе.

При наличии на объекте 3 и более шлюзов определять местоположение датчика на территории объекта возможно средствами LoRaWAN и без участия ГЛОНАСС/GPS трекера.

Телеметрия

Коммерческое применение технологии началось с передачи показаний счётчиков энергии. С тех пор разнообразие готовых датчиков в различных вариантах исполнения радикально увеличилось: газо- и расходомеры (в том числе электромагнитные и ультразвуковые), датчики температуры/давления/влажности для различных помещений (в том числе для холодильной техники), датчики загазованности, датчики движения, датчики наличия воды, датчики вибрации, датчики подсчёта людей в помещении, датчика скорости и направления ветра, датчики деформации и веса, датчики уровня сыпучих грузов/отходов в кузове/контейнере, датчики уровня жидкости и др. [18]. В сочетании с открытой архитектурой технологии это позволяет применять данную технологию в совершенно разных областях.

Известно применение решений на основе данной технологии различными подразделениями British Petroleum (BP). Так, компания BP Bitumnem проводит автоматизированный мониторинг целостности трубопроводов заводов производства битума [19]. Также использована в системе обнаружения утечек трубопроводов месторождений [15].

В России известно не так много примеров применения, но год от года количество объектов увеличивается. Так, «Варьеганнефть» начала проводить мониторинг состояния нефтегазосборной сети трубопроводов на удалённых элементах инфраструктуры с 2019 г. [20].

Иркутская нефтяная компания успешно провела испытания датчиков с технологией LoRaWAN на своих объектах в феврале 2020 г. [21]. Проект получил дальнейшее развитие расширением системы передачи данных телеметрии по сети LoRaWAN.

Также на объектах нефтедобычи технологии LoRaWAN используются на установках предварительного сброса воды, насосных станциях откачки пластовых вод, площадках поглощающих скважин.

Были предложения применить технологию для проверки утечек и потерь, например мониторинга утечек газа через продувочные трубопроводы [22].

Сама технология может быть элементом более крупной системы, и имеется пример её использования как элемента «цифровой скважины». В 2017 г. «дочерняя» компания «ЭР-Телеком Холдинга» «Энфорта» была заслуженно оценена за «...проект по цифровизации скважин компании «Волгодеминойл» на основе IoT-среды по технологии LoRaWAN и облачной платформы работы с данными...» [23].

Подано предложение к применению данной технологии в РЖД для мониторинга автоматического измерителя сопротивления заземления [24].

Защита от коррозии

Дальности действия технологии LoRaWAN достаточно для решения задач передачи данных для контроля процессов электрохимической защиты металлоконструкций на значительной части объектов добычи, хранения и переработки углеводородов. Сложности с прохождением радиосигнала в условиях больших объектов переработки обычно решаются расчётом зон радиопокрытия, увеличением количества шлюзов, использованием направленных антенн и размещением их на высотных сооружениях.

Для контроля процессов электрохимической защиты протяжённых продуктопроводов в транспорте углеводородов необходимо передавать данные на значительные расстояния. Ситуация бывает осложнена рельефами с перепадом по высоте, электромагнитными помехами от промышленных потребителей электроэнергии. В такой ситуации дальности передачи данных по технологии LoRaWAN (до 15 км) в базовом его варианте недостаточно.

В качестве решения может быть предложено изменение топологии сети из «звезды» в «шину» с использованием промежуточных ретрансляторов, или в «гибридную» с использованием и ретрансляторов, и оконечных устройств, выполняющих функции передачи данных от удалённых оконечных устройств.

Решение для контроля процессов электрохимической защиты трубопроводов транспорта от коррозии было реализовано [25] и имеет понятные преимущества как перед проводной системой, так и перед передачей данных через сети сотовых операторов.

В августе 2023 г. было выпущено обновление программного обеспечения, реализующее функцию ретрансляции внутри LoRaWAN сети [26]. Не являясь полноценной заменой шлюза, устройство с функцией ретранслятора может передавать транзитом данные с других оконечных устройств. Это экономически эффективный (по сравнению с установкой дополнительного шлюза) способ расширения зоны покрытия в случае протяжённых продуктопроводов, сложных условий распространения радиоволн на крупных промышленных площадках, отдельных удалённых объектах, перерабатывающих и химических производствах.

Безопасность

Данная технология предлагает неплохие встроенные средства защиты передаваемой информации. Так, передаваемые данные могут быть защищены как 128-битным сетевым ключом, так и 128-битным ключом приложения [1]. Это обеспечивает надёжную защиту передаваемых данных. При необходимости усилить защиту передаваемой информации возможно применением более устойчивого алгоритма шифрования, например гибридного алгоритма шифрования [27].

Высокая защита в сочетании с радиусом действия до 15 км (в условиях слабой застройки) открывает перспективы применения LoRa как в системах безопасности (сигнализации, пожароохранных системах, контрольно-пропускных системах, службах

корпоративной защиты (СКЗ), службах безопасности) [28], так и в системах промышленной безопасности.

Разнообразие современных датчиков позволяет автоматизировать системы промышленной безопасности и вывести их на ранее недостижимый уровень постоянного мониторинга. Это могут быть как простые извещатели прохождения персонала в опасные зоны или на особо опасные объекты (особо опасные объекты электроэнергетики, технологических процессов, высотные сооружения, крыши зданий, цистерны и т.д.), так и датчики загазованности, вредных и опасных веществ.

Перспективно применение датчиков, показывающих наличие средств оповещения и защиты в местах проведения работ, так как позволяют проводить мониторинг: 1) применения сотрудниками средств индивидуальной защиты (например, трансляцию сигналов датчиков «умная каска»); 2) наличия и работоспособности средств измерения и оповещения (например, датчика загазованности) в местах проведения работ; 3) приближения персонала к опасным зонам; 4) наличия персонала и техники в месте возникновения ЧП; 5) соблюдения режима труда и отдыха; 6) необходимости вызова помощи кому-либо из сотрудников (фиксация фактов падений, обездвижения).

Так, в 2020 г. на трёх предприятиях Алтайского края запустили пилотные проекты «Умная каска» [29]. В 2021 г. «Умная каска» от «Ростелеком», внедрённая на объекте АО «Хиагда» (Урановый холдинг «АРМЗ», госкорпорация «Росатом»), получила высокую оценку коллег и стала образцом цифровых средств индивидуальной защиты в горнорудной промышленности [30].

Заключение

Технология LoRaWAN позволяет преодолеть ограничения высокой стоимости, малой дальности и низкой энергоэффективности беспроводных подключений в первую очередь для M2M-взаимодействий. Имеющийся положительный опыт позволяет надеяться на широкое применение для обеспечения дальнейшего развития автоматизации и мониторинга в целях улучшения показателей эффективности различных процессов.

Литература

1. What is the LoRaWAN™ Specification [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://lora-alliance.org/about/lorawan/>, свободный (дата обращения: 25.09.2023).
2. Выдрин Д.Ф. Основные параметры беспроводной технологии LoRaWAN / Д.Ф. Выдрин, Д.Р. Ситдииков // Academy. – 2019. – Т. 42, № 2. – С. 22–24.
3. Application of lora wireless technology in IoT networks / N. Jafarov, M. Nasiyev, // Sciences of Europe. – 2022. – № 108. – С. 42–45.
4. Senet. Timeline of Innovation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://senetco.com/about/why-senet/>, свободный (дата обращения: 03.10.2023).
5. Эр-Телеком. Карта покрытия LoRaWAN сети [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://iot-ertelecom.ru/karta-pokrytija/>, свободный (дата обращения: 09.10.2023).
6. Лартех. Зона покрытия сети [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://lar.tech/partners/area>, свободный (дата обращения: 03.10.2023).
7. Эффективная интеллектуальная система учета электроэнергии для АО «Читаэнергообит» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://lar.tech/2-top-ru/237-aochitaenergosbyt>, свободный (дата обращения: 09.10.2023).
8. Глобальное сотрудничество АО «Мособлэнерго» и ООО «Лартех» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://lar.tech/projects/projects-008?ysclid=lnaclhh83j883136103>, свободный (дата обращения: 09.10.2023).
9. Сплит-счетчики для ИЭСК для ОАО «Иркутская электросетевая компания» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://lar.tech/projects/projects-002>, свободный (дата обращения: 09.10.2023).
10. «ЭР-Телеком» выводит на рынок промышленного «интернета вещей» комплексные решения для электросетевого комплекса России [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://wireless-e.ru/application/er-telekom/?ysclid=lnab8t02th673145497>, свободный (дата обращения: 03.10.2023).
11. Энергетика в цифре [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.kommersant.ru/doc/4046366?ysclid=lnve8aimuu140318349>, свободный (дата обращения: 18.10.2023).
12. ИТСК заключила соглашение с «ЭР-Телеком Холдинг» с целью внедрения технологии LoRaWAN [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.tadviser.ru/a/460968>, свободный (дата обращения: 03.10.2023).
13. В Татарстане расширяют сеть «умных» нефтяных скважин [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://burneft.ru/main/news/42457>, свободный (дата обращения: 03.10.2023).
14. «СИБУР» внедряет интернет вещей в «Казаньоргсинтезе» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.cnews.ru/news/line/2022-10-05_sibur_vnedryaet_internet?ysclid=lnadcuic5cj935822454, свободный (дата обращения: 03.10.2023).
15. Марисов Д.А. Интернет вещей в нефтегазовой сфере: анализ технологии LoRaWAN и возможности прикладного применения / Д.А. Марисов, А.Ю. Зацепин, Е.А. Марин, А.В. Терлеев, М.Ю. Ларионова // ПРОНЕФТЬ. Профессионально о нефти. – 2019. – № 2(12). – С. 76–80. – URL: https://ntc.gazprom-neft.ru/upload/uf/098/GPN_2_19_190619.pdf (дата обращения: 03.10.2023).
16. Machinemax [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://machinemax.com/pages/solutions>, свободный (дата обращения: 03.10.2023).
17. LoRaWAN® Vehicle and People Tracker [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://easyreach.co.in/lora-tracker>, свободный (дата обращения: 03.10.2023).
18. ThinkPark Community. Solution catalog. Devices [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://community.thinkingpark.org/iot-solutions-catalog/devices.html>, свободный (дата обращения: 03.10.2023).
19. Павлова З.Х. Современные технологии приемопередачи измерительной информации для организации сенсорных сетей мониторинга объектов нефтегазовой отрасли / З.Х. Павлова, А.Н. Краснов, Р.Р. Балтин // Международный научно-исследовательский журнал. – 2017. – № 5(59). – С. 79–81.
20. «В ПАО Варьеганнефть реализован проект по беспроводным технологиям» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://publishernews.ru/PressRelease/PressReleaseShow.asp?id=716671&ysclid=lnbs5eq9f67460841>, свободный (дата обращения: 04.10.2023).

21. Испытания оборудования ROSSMA IIOT-AMS на объектах нефтедобычи ООО «ИРКУТСКАЯ НЕФТЯНАЯ КОМПАНИЯ» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://rossma.ru/news/испытания-оборудования-rossma-iiot-ams-на-объект-3/?ysclid=lnbsp56hfr673514619>, свободный (дата обращения: 09.10.2023).

22. Балтин Р.Р. Система мониторинга утечек газа через продувочные трубопроводы / Р.Р. Балтин, А.Н. Краснов, Р.А. Майский // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2017. – № 2(13). – С. 62–67.

23. IX Всероссийский конкурс. Лучшие 10 ИТ-проектов для нефтегазовой отрасли [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://3.oil-gas.digital/contest_ru, свободный (дата обращения: 09.10.2023).

24. Евдокимова О.Г. Применение технологии интернета вещей для передачи данных от автоматического измерителя сопротивления заземления / О.Г. Евдокимова, С.М. Куценко, Б.А. Мешков // Изв. Петербургского университета путей сообщения. – 2023. – Т. 20, № 3. – С. 758–767.

25. Хакимов Р.Ф. Применение технологии «интернет вещей» в трубопроводном транспорте / Р.Ф. Хакимов, В.Ф. Даутов, О.Р. Латыпов // Территория Нефтегаз. – 2021. – № 3. – С. 12–13.

26. The New LoRaWAN® Relay Feature: A Powerful Tool for LoRa® and LoRaWAN Networks [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://blog.semtech.com/the-new-lorawan-relay-feature>, свободный (дата обращения: 09.10.2023).

27. Ван Чжэн. Разработка гибридной схемы шифрования на основе ECC и AES / Чжэн Ван, Цзяси Ли, Чжочэн Ли // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2022. – Т. 68, № 5. – С. 16–20.

28. Анисимов С.Л. К вопросу о возможности применения архитектуры сети loRa в охранных системах / С.Л. Анисимов, И.В. Лазарев, Н.С. Шаталов // Вестник Воронежского института МВД России. – 2022. – № 2. – С. 133–140.

29. «Умные каски» на предприятиях Алтайского края [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://slddigital.com/article/%D1%83mnye-kaski-na-predpriyatijah-%D0%B0ltajskogo-kraja/>, свободный (дата обращения: 09.10.2023).

30. «Умная каска» победила на конкурсе цифровизации горной индустрии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.it-world.ru/news-company/releases/173766.html>, свободный (дата обращения: 09.10.2023).

given based on the advantages and limitations of the technology. The results of this research are represented by an analytical review of current and promising areas for the application of systems with LoRaWAN.

Keywords: communication, data transmission, protocol, solution, LoRaWAN.

doi: 10.21293/1818-0442-2023-26-3-83-88

References

1. What is the LoRaWAN™ Specification. Available at: <https://loro-alliance.org/about-lorawan/>, free (Accessed: September 25, 2023).

2. Vydryn D.F., Sitdikov D.R. *Osnovnyje parametry bezprovodnoj tehnologii LoRaWAN* [The main parameters of wireless technology LoRaWAN]. *Academy*. – 2019, vol. 42, no 2, pp. 22–24 (in Russ.).

3. Jafarov N., Nasiyev M. Application of lora wireless technology in IoT networks. *Sciences of Europe*, 2022, no. 108, pp. 42–45.

4. Senet. Timeline of Innovation. Available at: <https://senetco.com/about/why-senet/>, free (Accessed: October 03, 2023).

5. *Er-Telecom. Karta pokrytiya LoRaWAN sety* [Er-Telecom. LoRaWAN Network Coverage Map]. Available at: <https://iot-ertelecom.ru/karta-pokrytiya/>, free. (Accessed: October 09, 2023) (in Russ.).

6. Latch. Area. Available at: <https://lar.tech/en/partners/area>, free (Accessed: October 03, 2023).

7. *Effektivnaya intelektualnaya sistema uchyota elektroenergiyi dlya AO «Chitaenergobyt»* [Effective intelligent system of electric energy accounting for JSC «Chitaenergobyt»]. Available at: <https://lar.tech/2-top-ru/237-ao-chitaenergobyt>, free. (Accessed: October 09, 2023) (in Russ.).

8. *Globalnoye sotrudnichestvo AO «Mosoblenergo» i OOO «Lartech»* [Global cooperation of Mosoblenergo JSC and Lartech LLC]. Available at: <https://lar.tech/projects/projects-008?ysclid=lnaclhh83j883136103>, free. (Accessed: October 09, 2023) (in Russ.).

9. *Split-schetchiku dlya OAO « Irkutsk Electrosetevaja kompanija»* [Split meters for JSC "Irkutsk Electric Grid Company"]. Available at: <https://lar.tech/projects/projects-002>, free. (Accessed: October 09, 2023) (in Russ.).

10. «ER-Telecom» vivodit na rynek promyshlennogo «Internet of Things» kompleksnyje resheniya dlya elektrosetevogo kompleksa Rossii [ER-Telecom introduces integrated solutions for the Russian electric grid complex to the industrial "Internet of Things" market]. Available at: <https://wireless-e.ru/application/er-telecom/?ysclid=lnab8t02th673145497>, free. (Accessed: October 03, 2023) (in Russ.).

11. *Energetika v tsifre* [Energy in digit]. Available at: <https://www.kommersant.ru/doc/4046366?ysclid=lnve8aimuu140318349>, free. (Accessed: October 18, 2023) (in Russ.).

12. *ITSK zaklychila soglasheniye s «R-Telecom Kholding»s tselu vnedreniya tehnologii LoRaWAN* [ITSK has signed an agreement with ER-Telecom Holding to introduce LoRaWAN technology]. Available at: <https://www.tadviser.ru/a/460968>, free (Accessed: October 03, 2023) (in Russ.).

13. *V Tatarstane rashirjaut set «umnykh» nefjtjanykh skvazhin* [Tatarstan expands the network of "smart" oil wells]. Available at: <https://burneft.ru/main/news/42457>, free. (Accessed: October 03, 2023) (in Russ.).

14. «SIBUR» vnedrjaet Internet veshey v «Kazanorgsintez» [SIBUR introduces the Internet of Things in Kazanorgsintez]. Available at: https://www.cnews.ru/news/line/2022-10-05_sibur_vnedryaet_internet?ysclid=lnadcuic5cj935822454, free (Accessed: October 03, 2023) (in Russ.).

Носов Алексей Филиппович

Гл. специалист Всерос. науч.-исслед. института природных газов и газовых технологий (ВНИИГАЗ) Газовиков ул., 15, стр. 1, п. Развилка, г.о. Ленинский, Московская область, Россия, 142717
Тел.: +7-985-766-38-46
Эл. почта: a_nosov@gwise.vniigaz.gazprom.ru

Nosov A.F.

Applicability of data transmission systems with LoRaWAN technology

An overview of existing and prospective applications of data transmission systems using LoRaWAN technology are presented. The options for the application in different areas are considered, an assessment of promising application areas is

15. Marisov D.A., Zatsepin A.Y., Marin E.A., Terleev A.V., Larionov M.Y. Internet of things in the oil and gas industry: LoRaWAN technology analysis & use cases. *PRONEFT. Professional'no o nefti*, 2019, no. 2(12), pp. 76–80 (in Russ.). Available at: https://ntc.gazprom-neft.ru/upload/uf/098/GPN_2_19_190619.pdf (Accessed: October 03, 2023).
16. Machinemax. Available at: <https://machinemax.com/pages/solutions>, free (Accessed: October 03, 2023).
17. LoRaWAN® Vehicle and People Tracker. Available at: <https://easyreach.co.in/lora-tracker>, free (Accessed: October 03, 2023).
18. ThinkPark Community. Solution catalog. Devices. Available at: <https://community.thinkpark.org/iot-solutions-catalog/devices.html>, free (Accessed: October 03, 2023).
19. Pavlova Z.H., Krasnov A.N., Baltin R.R. (2017). Modern technologies of transmitting measuring information for limitation of serial networks of objects of oil and gas industry monitoring. *International Research Journal*, 2017, № 5(59), pp. 79–81. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.59.108> (in Russ.).
20. A project on wireless technologies has been implemented at PJSC Varyeganeft. Available at: <https://publish-ernews.ru/PressRelease/PressReleaseShow.asp?id=716671&ysclid=lnbs5eq9f67460841>, free (Accessed: October 04, 2023).
21. *Ispytaniya oborudovaniya ROSSMA IIOT-AMS na obyektakh neftedobychi OOO «IRKUTSKAYA NEFTYANAYA-KONPANIYA»* [Testing of ROSSMA IIOT-AMS equipment at oil production facilities of IRKUTSK OIL COMPANY LLC]. Available at: <https://rossma.ru/news/испытания-оборудования-rossma-iiot-ams-на-объект-3/?ysclid=lnbsp56hfr673514619>, free (Accessed: October 09, 2023) (in Russ.).
22. Baltin R.R., Krasnov A.N., Maiski R.A. *Systema monitoring utechek gaza cherez produvochnyye nruboprovody* [Gas leak monitoring system through purgeable pipelines]. *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2017, no 2 (vol.13), pp. 62–67 (in Russ.).
23. The 9th All-Russian Contest. Top 10 IT Projects for Oil & Gas Industry. Available at: https://3.oil-gas.digital/contest_en, free (Accessed: October 09, 2023).
24. Evdokimova O.G., Kutsenko S.M., Meshkov B.A. *Priveneniye tehnologii Interneta veshey dlya peredachi dannykh ot avtomaticheskogo izmeritelya soprotivleniya zazemleniya* [Application of the Internet of Things Technology for Data Transmission from an Automatic Grounding Resistance Meter]. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, no 3, pp. 758–767 (in Russ.).
25. Hakimov R.F., Dautov V.F., Latypov O.R. *Primeneniye tehnologii Internet veshey v truboprovodnom transporte* [Application of the Internet of Things technology in pipeline transport]. *Territoriya Neftegas*, 2021, no 3, pp. 12–13 (in Russ.).
26. The New LoRaWAN® Relay Feature: A Powerful Tool for LoRa® and LoRaWAN Networks. Available at: <https://blog.semtech.com/the-new-lorawan-relay-feature>, free (Accessed: October 09, 2023).
27. Van Chzhen, Li Tsyyasi, Li Chzhochen. Development of a hybrid encryption scheme based on ECC and AES. *International Journal of Humanities and Natural Sciences*, 2022, vol. 5–2 (68), pp. 16–20.
28. Anisimov S.L., Lazarev I.V., Shatalov N.S. *K voprosu o vozmozhnosti primeneniya arkhitektury sety lora v okhrannykh sistemakh* [On the question of the possibility of using architecture lora networks in security systems]. *Vesnik Voronezhskogo instituta MVD Rosii*, 2022, no. 2, pp. 133–140 (in Russ.).
29. «Umnyje kaski» na predpriyatijakh Altayskogo kraja [«Smart helmets» at the enterprises of the Altai Territory]. Available at: <https://slldigital.com/article/%D1%83mnye-kaski-na-predpriyatijah-%D0%B0ltajskogo-kraja/>, free. (Accessed: October 09, 2023) (in Russ.).
30. *Umnaya kaska "pobedila na konkurse tsifrovizatsiya gornoy industriy* [«Smart Helmet» won the mining industry digitalization contest]. Available at: <https://www.it-world.ru/news-company/releases/173766.html>, free (Accessed: October 09, 2023) (in Russ.).

Alexey F. Nosov

Chief specialist, All-Russian Scientific Research Institute of Natural Gases and Gas Technologies (VNIIGAZ)
15, Gazovikov str., b. 1, Razvilka village, Leninsky city district, Moscow area, Russia, 142717
Phone: +7-985-766-38-46
Email: a_nosov@gwise.vniigaz.gazprom.ru

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 2003–2016. 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 буквы и греческие символы набираются прямым шрифтом, а переменные, обозначенные латинскими – курсивом, кроме слов, их сокращений, имен функций, программ, фирм и химических формул.

6. Формулы должны быть набраны в формульном редакторе (MathType) программы Word. Русские буквы, греческие символы, математические знаки (+, –, ×, ∈, =, скобки, ...) и цифры всегда набираются прямым не жирным шрифтом, а переменные (и кривые на графиках), обозначенные латинскими буквами или цифрами – курсивом, кроме англ. 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_x . Шаблоны для набора формул необходимо взять на сайте 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; Т, град; 7 °С). 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 на рис. – Times New Roman, 9 пт (после масштабирования), 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, после масштабирования – 9 кегль).

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.

Эл. почта: vnmas@tusur.ru. Тел.: +7 (382-2) 51-21-21



