



Доклады ТУСУР. 2021 • Том 24, № 3

ISSN 1818-0442

DOI: 10.21293/1818-0442



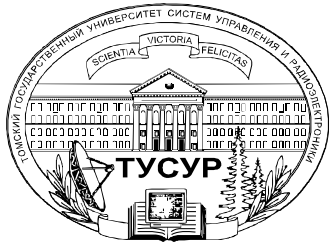
ДОКЛАДЫ

Томского государственного университета
систем управления и радиоэлектроники

2021 • Том 24, № 3



9 771818 044708 02007



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

**ДОКЛАДЫ
ТОМСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ
2021, том 24, № 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, Россия (*гл. редактор*).

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

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

В.Н. Масленников, к.т.н., доцент, ТУСУР, Томск, Россия (*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, Россия.

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, почётный работник высшего профессионального образования РФ, Томск, Россия.

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

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

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

Ю.Н. Кульчин, д.ф.-м.н., академик РАН, директор, ФГБУН «Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения РАН», Владивосток, Россия.

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, Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия, <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, Россия, <https://orcid.org/0000-0002-6255-8865>.

Н.А. Ратахин, д.ф.-м.н., академик РАН, директор, Институт сильноточной электроники (ИСЭ) СО РАН, Томск, Россия, <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, Россия.

А.Р. Сафин, к.т.н., доц., НИУ «МЭИ», Москва, Россия.

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

И.А. Ходашинский, д.т.н., проф. каф. комплексной информационной безопасности электронно-вычислительных систем (КИБЭВС) ТУСУРа, вед. науч. сотрудник лаб. медико-биологических исследований (ЛМБИ), Томск, Россия, <https://orcid.org/0000-0002-9355-7638>.

В.В. Шайдуров, 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, Россия, <https://orcid.org/0000-0002-7883-5804>.

С.М. Шандаров, д.ф.-м.н., проф., зав. каф. электронных приборов, ТУСУР, заслуженный работник высшей школы РФ, член Оптического общества Америки (OSA), член Международного НТО IEEE/LEOS, Томск, Россия, <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, почётный работник высшего профессионального образования РФ, почётный работник науки и техники РФ, лауреат Премии Правительства РФ в области образования, Томск, Россия.

Адрес редакции: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, ТУСУР, тел. (382-2) 51-21-21

Свидетельство о регистрации МНС РФ № 1027000867068 от 13 октября 2004 г.

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

Издательство Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники

634050, Томск, пр. Ленина, 40, тел. (382-2) 51-21-21.

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

Корректор В.Г. Лихачева.

Подписано в печать 25.09.2021. Формат 60×84 1/8. Печ. л. 5. Тираж 500. Заказ 19.

Editorial board

- Viktor M. Rulevskiy** Editor in Chief, Rector of TUSUR University, Scientific adviser at the Research Institute of Automation and Electromechanics (RI AEM) TUSUR, Doctor of Engineering.
- Alexander A. Shelupanov** Deputy Editor in Chief, President of TUSUR University, Doctor of 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, Russia, <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, Candidate of Engineering.
- Viktor N. Maslennikov** Executive Secretary of the Editor's Office, Candidate of Engineering.
- Mikhail P. Batura** Chief Researcher of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Belarus), Doctor of Engineering, Professor.
- Boris A. Belyaev** Head of the Electrodynamics Department, Institute of Physics SB RAS (Krasnoyarsk), Doctor of 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 Engineering, Professor.
- Yury P. Ekhlakov** Professor of the Department of Data Processing Automation, TUSUR University, Doctor of Engineering.
- Vyacheslav M. Isaev** First Deputy Director of the Mytishchi Research Institute of Radio Measurement Instruments, Doctor of Engineering.
- Gennady A. Kobzev** Vice-Rector for International Cooperation, TUSUR University, Candidate of Engineering.
- Anatoly M. Korikov** Professor of the Department of Automated Control Systems of TUSUR University, Doctor of Engineering.
- Yury N. Kulchin** Director of the Institute of Automation and Control Processes FEB RAS (Vladivostok), Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Physics and Mathematics.
- Vazgen Sh. Melikyan** Director of the Academic Department of Synopsis Armenia (Yerevan, Armenia), Correspondent Member of the National Academy of Sciences of Armenia, Doctor of Engineering, Professor.
- Sergey D. Odintsov** International Member of the Norwegian Academy of Science and Letters, Professor at Institute of Space Sciences, Barcelona, Spain, Doctor of Physics and Mathematics.
- Yefim M. Oks** Head of the Department of Physics, TUSUR University, Doctor of Engineering, Professor.
- Eduard D. Pavlygin** First Deputy General Director for Research of Federal Research-and-Production Center JSC R&P Mars, Candidate of Engineering.
- Nikolay A. Ratakhin** Director of Institute of High Current Electronics SB RAS, Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of 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 Engineering, Professor.
- Ansar R. Safin** Associate Professor, Department of Formation and Processing of Radio Signals, National Research University MPEI (Moscow), Candidate of Engineering.
- Pavel E. Troyan** Vice-Rector for Academic Affairs, Head of Department of Physical Electronics, Doctor of Engineering, Professor.
- Ilya A. Hodashinsky** Professor at Department of Complex Information Security of Computer Systems, TUSUR University, Leading Researcher at Laboratory of Medical and Biological Studies (LBMS), Tomsk, Russia, Doctor of Engineering.
- Vladimir V. Shaidurov** Director of the Institute of Computational Modeling SB RAS (Krasnoyarsk), Correspondent Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Physics and Mathematics, Professor.
- Stanislav M. Shandarov** Head of the Department of Electronic Devices, TUSUR University, Doctor of Physics and Mathematics, Professor.
- Yury A. Shurygin** First Vice-Rector of TUSUR University, Doctor of Engineering, Professor.

 Содержание

ЭЛЕКТРОНИКА, РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

Порубов Г.Г., Денисов В.П. Непараметрический алгоритм обработки сигналов в фазовых пеленгаторах с линейной антенной решеткой....	7
Солдатов А.И., Ким О.Х., Солдатов А.А., Костина М.А., Нариманова Г.Н. Бесконфликтный, отказоустойчивый и компактный программируемый коммутатор	12

УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА

Егошин Н.С. Модель типовых угроз безопасности информации, основанная на модели информационных потоков	21
Сивак М.А., Тимофеев В.С. Настройка робастных нейронных сетей для решения задачи классификации	26
Крюков Я.В., Покаместов Д.А., Рогожников Е.В., Новичков С.А., Лаконцев Д.В. Математическая модель оценки вероятности коллизий преамбул при случайном доступе в сценарии массового межмашинного взаимодействия	33
Кокин Д.С., Пономарев О.Г. Оценка соотношения между длиной коррелятора и числом абонентов в системе связи с цифровой псевдослучайной модуляцией	38
Захлебин А.С. Методика построения ортофотопланов местности с помощью беспилотного квадрокоптера, оснащенного навигационным геодезическим приемником	44
Катаев М.Ю., Карташов Е.Ю., Кузнецов А.А. Методика кластеризации сельскохозяйственных полей по RGB-изображениям беспилотных летательных аппаратов.....	50
Коллар М.Е. Цифровое маркирование аудиосигналов, основанное на модуляции MCLT-коэффициентов	57
Захарова А.А., Захаров Л.Ю. Информационная система опережающей подготовки кадров моногорода: концепция, функции и состав модулей.....	62
Мицель А.А., Шильников А.С. Имитационные модели систем оплаты труда.....	69
Касьян Е.А., Немирович-Данченко М.М. Применение метода анализа иерархий для выбора модели прогнозирования индекса потребительских цен России	74
Требования	80

ELECTRONICS, RADIO ENGINEERING, AND COMMUNICATIONS

Porubov G.G., Denisov V.P. Non-parametric algorithm of processing the signals in the phase direction finders with the linear aerial array	7
Soldatov A.I., Kim O.H., Soldatov A.A., Kostina M.A., Narimanova G.N. Conflict-free, fault-tolerant, and compact programmable switching unit.....	12

CONTROL, COMPUTER SCIENCE, AND INFORMATICS

Egoshin N.S. Model of typical threats to information security based on the model of information flows	21
Sivak M.A., Timofeev V.S. Adjusting robust neural networks for solving the classification problem.....	26
Kryukov Ya.V., Pokamestov D.A., Rogozhnikov E.V., Novichkov S.A., Lakontsev D.V. Math model for estimating the probability of preambles collisions within random access in the mMTC scenario	33
Kokin D.S., Ponomarev O.G. Estimation of the relation between the correlator length and the number of subscribers in a communication system with digital pseudo-random modulation	38
Zakhlebin A.S. Method to produce orthomosaics of the terrain using a helicopter-type UAV with an on-board navigation geodetic receiver	44
Kataev M.Yu., Kartashov E.Yu., Kuznetsov A.A. Technique for clustering agricultural fields based on RGB-images shot by unmanned aerial vehicles	50
Kollar M.E. Digital audio watermarking based on the modulation of MCLT-coefficients.....	57
Zakharova A.A., Zakharov L.Yu. Information system to support an advanced training of personnel for a monotown: concept, functions and composition of modules.....	62
Mitsel A.A., Shilnikov A.S. Statistical models for enterprise compensation system.....	69
Kasyan E.A., Nemirovich-Danchenko M.M. Application of the Analytic Hierarchy Process for choosing a forecasting model for the consumer price index in Russia.....	74
Manuscript requirements.....	80

**ЭЛЕКТРОНИКА,
РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ**

УДК 621.317.08

Г.Г. Порубов, В.П. Денисов

Непараметрический алгоритм обработки сигналов в фазовых пеленгаторах с линейной антенной решеткой

Предлагается алгоритм оценки пеленга по совокупности разностей фаз сигналов, измеренных между элементами антенной системы. Распределение вероятностей фазовых погрешностей не имеет значения. Особенностью алгоритма является то, что в нем отсутствует как отдельная операция процесс устранения неоднозначности фазовых измерений и восстановления полных разностей фаз.

Ключевые слова: фазовый пеленгатор, разность фаз, оценка пеленга.

doi: 10.21293/1818-0442-2021-24-3-7-11

Имеется два различных подхода к устранению неоднозначности измерений. Один из них основан на том, что в составе пеленгатора имеется достаточно малая фазометрическая база, обеспечивающая однозначное измерение в рабочем угловом секторе. Остальные базы служат для уточнения полученных на ней измерений. Точность пеленгования определяется самой большой базой. Этот подход обычно рассматривается в учебной литературе [1–3].

Второй подход статистический. Он предусматривает устранение неоднозначности измерений и последующее вычисление пеленга по всей совокупности разностей фаз сигналов, принятых элементами антенной системы [4–9]. При использовании данного метода не требуется, чтобы хотя бы одна из фазометрических баз обеспечивала однозначное измерение в рабочем угловом секторе. Для разрешения неоднозначности используются фазовые соотношения сигналов на различных базах. В настоящее время метод находит практическое применение, как в фазовых радиопеленгаторах, так и в других видах многошкальных фазовых измерительных систем [9–12].

Теоретической основой известных алгоритмов обработки совокупности измеренных разностей фаз является метод максимального правдоподобия, а измеряемая величина представляется параметром многомерного распределения вероятностей результатов измерений. Для использования метода надо задаться многомерным распределением вероятностей погрешностей измерения разностей фаз. Обычно это многомерный нормальный закон распределения. В ряде случаев это оправдано, например, когда систематические погрешности устранены, а источником случайных являются шумы приемных устройств. Однако, во многих случаях такая ситуация является идеализированной. Многие элементы фазометрических трактов, такие как разъемы, гибкие кабели, усилители и т.д. вносят паразитные фазовые сдвиги, которые трудно учесть.

В данной статье предлагается метод оценки пеленга по совокупности разностей фаз сигналов, измеренных между элементами антенной системы, в котором распределение вероятностей фазовых погрешностей знать не надо. Оценка пеленга не является параметром закона распределения вероятностей.

Поэтому мы назвали метод непараметрическим, следуя известной терминологии [13]. Новизной алгоритма является то, что в нем отсутствует как отдельная алгоритмическая операция процесс устранения неоднозначности фазовых измерений и восстановления полных разностей фаз.

В основу алгоритма положено сравнение вектора измеренных разностей фаз с вектором расчетных разностей фаз, соответствующим некоторому пеленгу, и подбор такого расчетного вектора, который наиболее соответствует результатам измерений.

Рассмотрим n – базовый фазовый пеленгатор с произвольным числом баз. Для удобства выкладок условимся фазовые измерения представлять в величинах $\text{рад}/2\pi$. Тогда полная разность фаз сигналов на i -й базе пеленгатора определяется по формуле

$$\Phi_i = n_{xi} \sin \alpha + \delta_i = \phi_i + \delta_i + k_i, \quad (1)$$

где $n_{xi} = l_i/\lambda$ – база в длинах волн пеленгуемого источника сигнала (относительная база в терминологии монографии [6]); α – угол прихода плоской волны, отсчитанный от нормали к антенной решетке, ϕ_i – разность фаз, точно соответствующая углу прихода волны; δ_i – ошибка измерений разности фаз; k_i – число полных периодов разности фаз Φ_i на базе l_i , утраченных при измерении в силу периодичности сигналов.

Представим антенную систему пеленгатора вектором относительных баз

$$\vec{n}_x = (n_{x1}, n_{x2}, \dots, n_{xm}). \quad (2)$$

В данной работе самая большая база обозначается индексом «1». Все остальные (меньшие) базы называются дополнительными.

Среди фазометрических баз может не быть ни одной, обеспечивающей однозначное пеленгование в заданном секторе. Сектор однозначного пеленгования определяется всей совокупностью баз. Не будет существенным ограничением, если считать, что базы относятся друг к другу как простые целые числа. Положим для краткости письма $\sin \alpha = v$.

Тогда можно записать

$$\mathbf{n}_x = \Delta v_{\text{одн}} \mathbf{e}, \quad (3)$$

где \mathbf{e} – вектор взаимно простых целых чисел (базы в целых числах в терминах статьи [13]); $\Delta v_{\text{одн}}$ – интервал однозначного пеленгования системой баз [6, 14].

Если относительные базы n_{x_i} взаимно простые числа, $\mathbf{n}_x = \mathbf{e}$, то интервал однозначного пеленгования по $\sin \alpha$ (фактически по направляющему косинусу волны) равен единице, $\Delta v_{\text{одн}} = 1$ (угловой сектор $\pm 30^\circ$).

Если $\Delta v_{\text{одн}} \neq 1$, то фазовые соотношения на интервале однозначности, следующем из формулы (3), аналогичны имеющим место при $\mathbf{n}_x = \mathbf{e}$ в секторе $\Delta v_{\text{одн}} = 1$.

Поэтому в дальнейшем мы будем рассматривать работу пеленгатора в этом секторе, считая, что относительные базы взаимно простые числа. Важно, что при таком подходе в секторе однозначности пеленгатора на каждой базе укладывается целое число «своих» секторов неоднозначности. Рабочий угловой сектор пеленгатора может быть значительно меньше сектора однозначности [5].

Допустим, что по некоторому источнику, находящемуся на азимуте α_r , выполнено измерение разностей фаз. В соответствии с формулой (1) на i -й базе измеренная разность фаз будет

$$\phi_{ri} = \Phi_i - \langle \Phi_i \rangle = \phi_i + \delta_i,$$

где Φ_i – полная разность фаз; $\langle \cdot \rangle$ – операция округления до ближайшего целого.

По результатам измерений получен n -мерный вектор разностей фаз, где n – количество баз пеленгатора,

$$\boldsymbol{\phi}_r = (\phi_{r1}, \phi_{r2}, \dots, \phi_{rn}). \quad (4)$$

Для вычисления измеряемого пеленга выполняется сравнение вектора измеренных разностей фаз (4) с n -мерным вектором расчетных разностей фаз $\boldsymbol{\phi}_p$

$$\boldsymbol{\phi}_p = (\phi_{p1}, \phi_{p2}, \dots, \phi_{pn}). \quad (5)$$

Компоненты вектора расчетных разностей фаз (5) определяются по формуле

$$\phi_{pi} = e_i v_p - \langle e_i v_p \rangle, \quad (6)$$

где e_i – базы в целых числах; v_p – заданное значение азимута; $\langle \cdot \rangle$ – операция округления до ближайшего целого.

Сравнение измеренного и расчетного векторов производится при последовательном изменении направляющего косинуса в интервале однозначности системы.

Предварительно определяется максимально возможное число полных периодов разностей фаз, потерянных при измерении на максимальной базе e_1 , в пределах рабочего сектора пеленгатора по формуле

$$k_1 = \langle e_1 \sin \alpha \rangle, \quad (7)$$

где $\alpha = \pm \alpha_{\text{раб}}$ – величина рабочего сектора пеленгатора, отсчитанного от нормали к антенной решетке; $\langle \cdot \rangle$ – операция округления до ближайшего целого.

Определяется шаг изменения пеленга при изменении полной разности фаз на максимальной базе на величину 2π по формуле

$$v_1 = 1/e_1. \quad (8)$$

Вычисляется начальное значение пеленга, определяемого измеренной разностью фаз по формуле (1) на максимальной базе,

$$v_{\text{мин}} = \phi_{r1}/e_1, \quad (9)$$

где ϕ_{r1} – измеренная разность фаз на максимальной базе e_1 .

В формулах (6)–(9) база e_1 представлена в целых числах.

При последовательном задании числа потерянных периодов разностей фаз на максимальной базе k_1 в пределах, определяемых по формуле (7), находятся пеленги по формуле

$$v_p = v_{\text{мин}} + v_1 k_1, \quad (10)$$

где $v_{\text{мин}}$ – начальное значение пеленга (9); v_1 – величина изменения пеленга (8); k_1 – число полных разностей фаз, утраченных при измерении.

Выполняется вычисление вектора расчетных разностей фаз $\boldsymbol{\phi}_p = (\phi_{p1}, \phi_{p2}, \dots, \phi_{pn})$ при последовательном задании k_1 в (10) по формуле (6).

После каждого такта задания азимута по формуле (10) и вычисления вектора разностей фаз по формуле (6) определяются разности

$$\psi_i = \phi_{ri} - \phi_{pi} - \langle \phi_{ri} - \phi_{pi} \rangle, \quad (11)$$

где ϕ_{ri} – результат измерения разности фаз на базе e_i ; ϕ_{pi} – результат вычисления разности фаз на базе e_i по формуле (6); $\langle \cdot \rangle$ – операция округления до ближайшего целого.

Условие определения искомого пеленга $\sin \alpha_r = v_{\text{иск}}$ запишется в виде

$$|\psi_i| \leq z_{\phi i}, \quad (12)$$

где $i = 2, 3, \dots, n$ – номера дополнительных баз; $z_{\phi i}$ – величина разрешенной зоны по фазе для дополнительной базы e_i , вычисленная по формуле

$$z_{\phi i} = 0,5 \Delta_i, \quad (13)$$

где Δ_i – отклонение измеренной разности фаз на дополнительной базе e_i с направлений, отличных от истинного пеленга, для которых на максимальной базе e_1 разность фаз изменяется на $k_1 2\pi$ радиан. Мы используем здесь термин «разрешенная зона по фазе», введенный в статье [13]. Очевидно

$$\Delta_i = k_1 2\pi \frac{e_i}{e_1} - \left\langle k_1 2\pi \frac{e_i}{e_1} \right\rangle. \quad (14)$$

Величина Δ_i на дополнительной базе e_i находится по формуле (14) при задании величин $k_1 \neq 0$ в пределах, определяемых формулой (7).

В векторе расчетных разностей фаз Φ , вычисленном по (6), включены погрешности измерения разности фаз, полученные при измерении разности фаз на максимальной базе e_1 (9).

При вычислении разностей по (11) учитываются погрешности фазовых измерений на большой и дополнительных базах. Если это случайные величины с нулевыми средними значениями, равными дисперсиями σ_ϕ^2 и коэффициентом корреляции r_i , то СКО разности можно вычислить по формуле

$$\sigma_i = \sigma_\phi \sqrt{\frac{e_{x1}^2 + e_{xi}^2 - 2r_i e_{x1} e_{xi}}{e_{x1}^2}}$$

Если условие (12) не выполняется хотя бы по одной из дополнительных баз, то решение о выборе пеленга не принимается и поиск продолжается.

При выполнении условия (12) одновременно по всем дополнительным базам принимается решение о том, что искомый пеленг найден и равен заданному пеленгу в уравнении (10).

$$V_{иск} = V_p. \tag{15}$$

Рассматриваемый алгоритм можно характеризовать вероятностью правильного разрешения неоднозначности измерений (не допускаются грубых ошибок определения пеленга за счет неверного определения числа полных периодов разностей фаз) и СКО пеленгования при этом условии. Для вычисления этих данных надо задать закон распределения вероятностей фазовых погрешностей.

Формула для вероятности правильного разрешения неоднозначности (обозначим ее P_0) непосредственно следует из алгоритма (12)

$$P_0 = \int_{-z_{\phi i}}^{z_{\phi i}} \dots \int_{-z_{\phi n}}^{z_{\phi n}} w_{n-1}(y_2, \dots, y_n) dy_2 \dots dy_n, \tag{16}$$

где n – число баз пеленгатора; $z_{\phi i}$ – разрешенная зона по фазе базы e_i (13); $w_{n-1}(y_2, \dots, y_n)$ – плотность распределения вероятностей случайных величин ψ_i (12).

Для корректного вычисления СКО пеленгования надо знать условное распределение вероятностей совокупности случайных величин (12) при условии выполнения неравенства (12). Чтобы не преодолевать математические трудности, можно воспользоваться цифровым моделированием для конкретных условий. Подобный пример содержится в статье [15]. Верхнюю границу СКО можно оценить, считая, что точность определяется самой большой базой [7].

Методом математического моделирования выполнена оценка характеристик пеленгатора при вы-

числении пеленга по предлагаемому алгоритму в предположении, что фазовые погрешности подчиняются нормальному закону распределения вероятностей. Моделирование выполнено для антенной структуры $e = (e_1, e_2, e_3) = (9, 6, 4)$, являющейся оптимальной по критерию максимума P_0 при заданных габаритных размерах антенной системы и числе антенн (вариант 6 таблицы из статьи [14]).

На рис. 1 приведена зависимость вероятности правильного пеленгования и вероятности регистрации ложного пеленга от СКО фазовых ошибок, полученная по результатам моделирования. Там же приведены результаты расчетов вероятности правильного пеленгования по формуле (16).

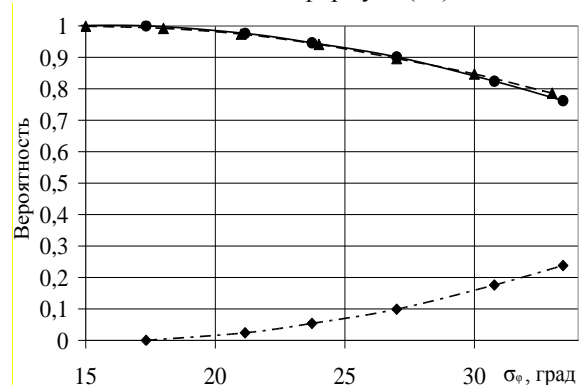


Рис. 1. Зависимости вероятностей правильного и ложного пеленгования от СКО фазовых ошибок: ▲ – вероятность правильного пеленгования по (16); ● – вероятность правильного пеленгования по результатам моделирования; ◆ – вероятность ложного пеленгования по результатам моделирования

Из графиков рис. 1 видно, что вероятность правильного пеленгования при вычислении пеленга по данному алгоритму практически совпадает с аналитической оценкой по формуле (16).

В таблице приведены результаты оценки вероятностей правильного и ложного пеленгования и оценки точности пеленгования по результатам многократного моделирования.

Результаты оценки вероятности пеленгования и ошибок пеленгования

Фазовые ошибки σ_ϕ , град	Ошибки пеленгования σ_a , град	Вероятности пеленгования	
		P_0	$P_{лож}$
13,5	0,225	1	0
17,5	0,315	1	0
21,2	0,36	0,976	0,024
23,7	0,42	0,946	0,054
27	0,465	0,9	0,1
30,7	0,517	0,825	0,175
33,5	0,54	0,762	0,238

Анализ табличных данных показывает, что вероятность правильного пеленгования предлагаемым алгоритмом несколько ниже, чем при использовании метода максимального правдоподобия, разработанного для нормального распределения вероятностей фазовых погрешностей. Данные по методу мак-

симального правдоподобия для рассматриваемой антенной решетки приведены в статье [14]. СКО пеленга мало отличается от рассчитанного по самой большой базе при заданном значении СКО фазовых погрешностей.

Выше был произведен расчет пеленгатора, имеющего «базы в целых числах». Если это условие не выполняется, но выполняется условие (3), пеленг вычисляется по формуле

$$\alpha = \arcsin(v_{\text{иск}} \Delta_{\text{одн}}),$$

где $\Delta_{\text{одн}}$ – сектор однозначного пеленгования определяется, исходя из формулы (3).

Выводы

Сравнительный анализ предлагаемого и максимально правдоподобного алгоритмов вычисления пеленга при нормальном распределении вероятностей фазовых погрешностей подтвердил эффективность предлагаемого алгоритма.

Алгоритм прост, для вычисления пеленга достаточно вектора измеренных фаз.

Алгоритм может быть рекомендован к использованию в пеленгаторах с линейной антенной решеткой и в других видах многошкальных фазовых измерителей.

Работа выполнена в рамках проекта по госзадачу Минобрнауки РФ № FEWM-2020-0039.

Литература

1. Радиотехнические системы: учебник для вузов / Ю.М. Казаринов и др.; под ред. Ю.М. Казаринова. – М.: Академия, 2008. – 592 с.
2. Бакулев П.А. Радиолокационные системы: учебник для вузов. – М.: Радиотехника, 2015. – 440 с.
3. Куприянов А.И. Радиоэлектронная борьба. – М.: Вузская книга, 2013. – 360 с.
4. Собцов Н.В. Оценка максимального правдоподобия в многошкальной фазовой измерительной системе // Радиотехника и электроника. – 1973. – Т. 18, № 6. – С. 1180.
5. Белов В.И. Теория фазовых измерительных систем. – Томск: Изд-во ТУСУРа, 2007. – 147 с.
6. Денисов В.П. Фазовые радиопеленгаторы / В.П. Денисов, Д.В. Дубинин. – Томск: Изд-во ТУСУРа, 2002. – 251 с.
7. Пензин В.К. Алгоритмы оперативной обработки многошкальных измерений по критерию максимального правдоподобия // Радиотехника и электроника. – 1990. – Т. 35, № 1. – С. 97.
8. Кинкулькин И.Е. Глобальные навигационные спутниковые системы: алгоритмы функционирования аппаратуры потребителя. – М.: Радиотехника, 2018. – 325 с.
9. Коротков П.И. Алгоритмы оценивания вектора параметров объекта для многоканальной фазовой измерительной системы: дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Омск: Омск. гос. техн. ун-т, 2016. – 128 с.
10. Патент РФ 2580827 С1, МПК G 01 S 1/00 (2006.01). Способ угловой ориентации объекта / В.Н. Рашутняк, Д.Д. Дмитриев, Ю.Л. Фатеев, В.Н. Тяпкин, Н.С. Кремез, Е.Н. Гарин. – Опубл.: 10.04.16. – Бюл. № 10.
11. А.с. 993146 СССР, МПК G01R 25/00 (2000.01) Устройство разрешения неоднозначности фазовых измерений / И.Г. Неплохов. – Опубл. 30.01.1983, Б.И. № 4. – С. 227.
12. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники: в 3 кн. – Кн. 3. – М.: Сов. радио, 1976. – 288 с.

13. Порубов Г.Г. Методика выбора оптимальных структур антенных решеток фазовых пеленгаторов и оценка вероятностных характеристик // Доклады ТУСУР. – 2017. – Т. 20, № 1. – С. 5–9.

14. Порубов Г.Г. Методика расчёта антенных структур многобазовых фазовых пеленгаторов / Г.Г. Порубов, В.П. Денисов // Доклады ТУСУР. – 2015. – № 3 (37). – С. 25–32.

15. Денисов В.П. Исключение аномально больших ошибок пеленгования в процессе устранения неоднозначности измерений в фазовых пеленгаторах, реализующих метод максимального правдоподобия / В.П. Денисов, Д.В. Дубинин, А.А. Мещеряков // Радиотехника и электроника. – 2016. – Т. 61, № 10. – С. 957–963.

Порубов Геннадий Гаврилович

Инженер ОАО «НИИАП», г. Новосибирск
Дзержинского пр-т, 87, г. Новосибирск, Россия, 630051
Тел.: 8 (383-2) 79-52-28
Эл. почта: porub27@mail.ru

Денисов Вадим Прокопьевич

Д-р тех. наук, проф. каф. радиотехнических систем (РТС)
Томского государственного ун-та (ТУСУР)
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел: +7 (382-2) 41-36-70
Эл. почта: dvp15@sibmail.com

Porubov G.G., Denisov V.P.

Non-parametric algorithm of processing the signals in the phase direction finders with the linear aerial array

The algorithm of estimating the bearing according to a set of differences of the signal phases measured between the elements of the aerial system is suggested. It is not necessary to know the distribution of the probabilities of the phase errors. The peculiarity of the algorithm is that there is no process of eliminating the ambiguity of the phase measurements and of restoring the total phase differences as a separate operation.

Keywords: phase direction finder, difference in phases, estimation of bearing.

doi: 10.21293/1818-0442-2021-24-3-7-11

References

1. *Radio tekhnicheskie sistemy: uchebnik dlya vuzov* [Radio-technical systems: manual for higher institutions]. Yu.M. Kazarinov et al, ed. by Yu.M. Kazarinov. Moscow, Academia, 2008. 592 p. (in Russ.).
2. Bakulev P.A. *Radiolokatsionnye sistemy* [Radiolocation systems. Manual for higher institutions]. Moscow, Radio Engineering, 2015. 440 p. (in Russ.).
3. Kupriyanov A.I. *Radioelektronnaya borjba* [Radio-electronic warfare]. Moscow, Vuzovskaya kniga, 2013. 360 p. (in Russ.).
4. Sobtsov N.V. *Otsenka maksimal'nogo pravdopodobiya v mnogoshkal'noj fazovoj izmeritel'noj sisteme* [Estimation of maximum verisimilitude in the multiscale phase measurement system]. *Radio Engineering and Electronics*, 1973, vol. 18, no. 6, 1180 p. (in Russ.).
5. Belov V.I. *Teoriya fazovykh izmeritel'nykh sistem* [Theory of phase measurement systems]. Tomsk. Publishing office of TUSUR University, 2007, 147 p. (in Russ.).

6. Denisov V.P., Dubinin D.V. *Fazovye radiopelengatory* [Phase radio direction finders]. Tomsk. Publishing office of TUSUR University, 2202, 251 p. (in Russ.).

7. Penzin V.K. *Algoritmy operativnoj obrabotki mnogoshkalnykh izmerenij po kriteriyu maksimal'nogo pravdopodobiya* [Algorithm of operational processing of multiscale measurements by the criterion of maximum verisimilitude]. *Radio Engineering and Electronics*, 1990, vol. 35, no. 1, 97 p. (in Russ.).

8. Kinkulkin I.E. *Globalnye navigatsionnye sputnikovye sistemy: algoritmy funktsionirovaniya apparatury potrebitelya* [Global navigation satellite systems: algorithms of functioning the user devices]. Moscow, Radio Engineering, 2018, 325 p. (in Russ.).

9. Korotkov P.I. *Algoritmy otsenivaniya vektora parametrov objekta dlya mnogokanal'noj fazovoj izmeritel'noj sistemy* [Algorithms of estimating the vector of object parameters for the multichannel phase measurement system]. PhD thesis. Omsk State Technical University, 2016, 128 p. (in Russ.).

10. Ratushnyak V.N., Dmitriev D.D., Fateev Ju.L., Tyapkin V.N., Kremez N.S., Garin E.N. *Sposob uglovoj orientatsii objekta* [Method of the object angular orientation]. Patent RF, no. 2580827, 2016.

11. Neplokhov I.G. *Ustrojstvo razresheniya neodnoznachnosti fazovykh izmerenij* [Device for solving the ambiguity of phase measurements]. Authorship Certificate USSR, no. 993146, 1983.

12. Levin B. R. *Teoreticheskie osnovy statisticheskoy radoptekhniki* [Theoretical fundamentals of static radio engineering]. In 3 Book, Book 3. Moscow, Sov. radio, 1976, 288 p. (in Russ.).

13. Porubov G.G. *Metodika vybora optimal'nykh struktur antenykh reshetok fazovykh radiopelengatorov i otsenka*

veroyatnostnykh kharacteristics [Methods of choosing the optimal structures of the aerial arrays of the phase direction finders and the estimation of the probable characteristics]. *Proceedings of TUSUR University*, 2017, vol. 20, no. 1, pp. 5–9 (in Russ.).

14. Porubov G.G., Denisov V.P. *Metodika rascheta antennih struktur mnogobazovih fazovykh pelengatorov* [Methods of calculating the structures of antenna arrays for multi-base phase direction finders]. *Proceedings of TUSUR University*, 2015, vol. 37, no. 3, pp. 25–32 (in Russ.).

15. Denisov V.P., Dubinin D.V., Meshcheryakov A.A. *Isklyuchenie anomal'no bol'shikh oshibok pelengovaniya* [Exclusion of abnormally large errors of bearing during the process of eliminating the measurement ambiguity in phase direction finders implementing the method of maximum probability]. *Radio Engineering and Electronics*, 2016, vol. 61, no. 10, pp. 957–963 (in Russ.).

Gennadiy G. Porubov

Engineer, OJSC «NIIAP», Novosibirsk
87, Dzerzhinsky pr., Novosibirsk, Russia, 630051
Phone: +7 (383-2) 79-52-28
Email: porub27@mail.ru

Vadim P. Denisov

Doctor of Science in Engineering, Professor,
Department of Radio Engineering Systems, Tomsk State
University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 41-36-70
Email: dvp15@sibmail.com

УДК 621.382

А.И. Солдатов, О.Х. Ким, А.А. Солдатов, М.А. Костина, Г.Н. Нариманова

Бесконфликтный, отказоустойчивый и компактный программируемый коммутатор

Приводится техническое решение построения коммутатора. Исследуются его бесконфликтность, отказоустойчивость и компактность. На примере коммутатора на 16 выводов показано, что предложенная структура коммутатора позволяет выполнять электрические соединения на всем множестве внешних выводов со 100% использованием ресурсов по количеству реализуемых цепей. Приведены два варианта реализации 8 цепей на 16-выводном коммутаторе. Показана его отказоустойчивость. Предложенный подход построения коммутатора позволяет реализовать коммутатор любого размера с уменьшением количества ключевых элементов.

Ключевые слова: кросс-бар, кросс-маршрутизатор, программируемая коммутационная среда, бесконфликтность, отказоустойчивость, компактность.

doi: 10.21293/1818-0442-2021-24-3-12-17

В настоящее время кластерные многопроцессорные вычислительные системы (МВС) и суперкомпьютеры являются основной вычислительной платформой для большинства современных технических комплексов. Известные архитектуры кластерных МВС и суперкомпьютеров (векторные, конвейерные и др.) функционально ориентированы и направлены на выполнение определенного класса вычислительных алгоритмов. В разных прикладных применениях используются наиболее оптимальные архитектуры МВС и суперкомпьютеров.

Общей проблемой для всех типов архитектур кластерных МВС и суперкомпьютеров является разработка бесконфликтного, отказоустойчивого и компактного кросс-бара на большое количество абонентов, способного парировать в режиме on-line большое количество отказов. Кросс-бар обеспечивает связь между абонентами по принципу «каждый с каждым». Бесконфликтный, отказоустойчивый и компактный кросс-бар необходим для разработки высокопроизводительных и отказоустойчивых мультислойных процессорных узлов в виде СБИС и/или сложного модуля 3D-интеграции.

Для кластерных МВС и суперкомпьютеров, использующих интерфейсы и протоколы SpaceWire-GigaSpaceWire-SpaceFibre, получивших широкое признание в аэрокосмической отрасли [1–3], актуальной проблемой является разработка бесконфликтной, отказоустойчивой и компактной системы коммутации (NxN), обеспечивающей связь между двумя группами абонентов по принципу «каждый с каждым». Бесконфликтная, отказоустойчивая и компактная система коммутации (NxN) необходима для разработки в виде СБИС или/и сложного модуля 3D-интеграции электронных компонентов кросс-маршрутизаторов, обеспечивающей связь по принципу «каждый с каждым» между процессорами, входящими в разные процессорные узлы.

В системе PERCS (Productive Easy-to-use Reliable Computing System) фирмы IBM [4] процессорный узел содержит 4 процессора Power PC, связанных между собой кросс-баром по принципу

«каждый с каждым». В системе YARC фирмы CRAY [5] процессорный узел представлен 4 спаренными процессорными чипами Xeon, также связанными между собой системой коммутации типа кросс-бар. Попытка увеличения количества процессоров в процессорном узле до 8 в системе YARC привела к ухудшению технических характеристик и свойств используемого кросс-бара.

В рассматриваемых аналогах кластерных суперкомпьютеров (системе PERCS и системе YARC) кросс-бар для процессорного узла выбран благодаря его свойству бесконфликтности. Этот выбор можно считать вынужденным и обоснованным с технической точки зрения. Другие топологии сетей (сеть Клоза, мульти (кольца), гиперкубы, торы и др.) в сравнении с кросс-баром имеют меньшую аппаратную избыточность, но по этой причине всем этим системам коммутации неизбежно присущи сетевые конфликты и тупики, за которыми встают такие проблемы, как размещение больших буферов по сети, управление маршрутизацией, введение виртуальных каналов и, по сути, разработка специфичной сетевой операционной системы (ОС). Все известные топологии сетей, в том числе и кросс-бар, не отказоустойчивы и по этой причине резко снижают производительность процессорных узлов при появлении хотя бы одного дефекта, а при появлении нескольких дефектов процессорный узел часто «зависает» и/или работает практически «вхолостую».

Актуальность проблемы состоит в том, что электрической схемы бесконфликтного, отказоустойчивого и компактного кросс-бара, способного парировать в режиме on-line большое количество отказов, в настоящее время не существует. Размерность существующих аналогов ограничена 4–6 абонентами по причине квадратичного роста объема аппаратуры при увеличении числа абонентов и проблемами обеспечения бесконфликтной маршрутизации информации между абонентами по мере увеличения числа абонентов.

Лучшим отечественным решением поставленной проблемы считается 24-портовый кросс-бар

ОАО НИЦЭВТ (2018) [6–8]. Кросс-бар выполнен в виде кристалла с архитектурой полного графа (8x8), затем четыре кристалла соединили в один маршрутизатор. Для этого по два порта от каждого кристалла пришлось использовать на соединение кристаллов между собой. Оставшиеся 24 порта используются для внешних соединений. В этом кросс-баре часто возникают трудно прогнозируемые конфликты, потери в отказоустойчивости и другие проблемы. Этот кросс-бар можно назвать кросс-баром условно.

Существующие аналоги систем коммутации сигналов (NxN) также не обладают отказоустойчивостью, так как между любыми двумя выводами из (NxN) существует только один путь и при отказе хотя бы одного ключевого элемента маршрутизации информации по этому пути становится невозможной. Бесконфликтная, отказоустойчивая система коммутации (NxN) на большое число абонентов в настоящее время также еще не создана.

Постановка задачи

В связи с этим в настоящее время единственным выходом для повышения надежности процессорных узлов и кросс-маршрутизаторов является резервирование всех кросс-баров и систем коммутации (NxN) путем дублирования и/или мажорирования. При этом имеет место соответствующий кратный рост объема аппаратуры при незначительном увеличении надежности системы в целом.

Из существующих технических идей решения этой проблемы можно выделить исследования, проведенные отечественными учеными М.Ф. Караваем, В.С. Подлазовым [9]. Исследователями предложена новая концепция построения кросс-маршрутизаторов с логическими функциями квазиполного графа на базе разработанной математической модели структуры сетей SpaceWire-GigaSpaceWire-SpaceFibre – теоретико-групповые блок-схемы (block-designs) в комбинаторике: $B(N, s, \sigma)$, где N – число вершин (абонентов); s – степени всех узлов графа; σ – степень резервирования связей. Эквивалентная ей графовая модель – двудольный граф (рис. 1), где одна группа вершин интерпретируется как абоненты (прямоугольники), а вторая – как локальные коммутаторы (окружности).

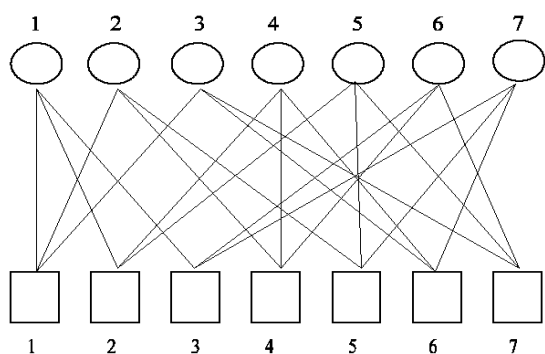


Рис. 1. Двудольный граф 7x7

Эта конструкция была названа авторами *квазиполным графом*, чтобы подчеркнуть совпадение логических характеристик с характеристиками полно-

го графа для того же числа абонентов. В то же время число портов и линков у квазиполного графа уменьшается в \sqrt{N} раз. Для 100 абонентов число портов у абонентов сокращается в 10 раз. Доказано, что это решение минимальное. Любая попытка редукции этого решения приводит к потере достигнутых свойств полного графа. В общем виде эта задача принадлежит к классу *NP-полных задач*, что означает доступность точного решения универсальной задачи только через полный перебор всех возможностей.

Общее количество абонентов и локальных коммутаторов равно N . Степени всех узлов графа равны s . Степень резервирования связей – σ . Между параметрами графа существует зависимость

$$N = s \frac{s-1}{\sigma} + 1. \quad (1)$$

Таким образом, современный уровень решения рассматриваемой проблемы – это кросс-бар на (4–8) абонентов, не обладающий отказоустойчивостью. Причина – квадратичный рост объема аппаратуры и проблемы обеспечения бесконфликтной маршрутизации информации между абонентами по мере увеличения числа абонентов и отсутствие электрической схемы кросс-бара, обладающего отказоустойчивостью.

По мнению авторов статьи, основным источником проблем, возникающих при разработке высокопроизводительных и отказоустойчивых кластерных МВС и суперкомпьютеров, является отсутствие электрической схемы системы коммутации, позволяющей разработать:

1) бесконфликтный, отказоустойчивый и компактный кросс-бар на большое число абонентов, например до 64 абонентов;

2) бесконфликтную, отказоустойчивую и компактную систему коммутации (NxN) на большое число абонентов, например до (64x64), для разработки бесконфликтных и отказоустойчивых кросс-маршрутизаторов для сетей SpaceWire-GigaSpaceWire-SpaceFibre.

Предлагаемое решение

Обозначенные выше проблемы создания кластерных МВС и суперкомпьютеров предлагается решить на базе разработанного бесконфликтного и компактного программируемого коммутатора [10–12]. Бесконфликтность подразумевает полную независимость каждого электрического соединения от других. На рис. 2 представлена схема коммутатора на 16 внешних выводов (абонентов). Внешние выводы коммутатора для подключения абонентов представлены группами вертикальных шин (A1-A4, B1-B4, C1-C4, D1-D4) верхней группы матричных коммутаторов K1.1...K1.4. Предлагаемая концепция построения коммутатора основана на использовании двух групп матричных коммутаторов уменьшенной размерности, в которых i -е горизонтальные шины каждого матричного коммутатора верхней группы соединяются с i -ми вертикальными шинами i -го матричного коммутатора нижней группы, что позволяет обеспечить выполнение любых электрических соединений по принципу «точка-точка» на всем множестве внешних выводов.

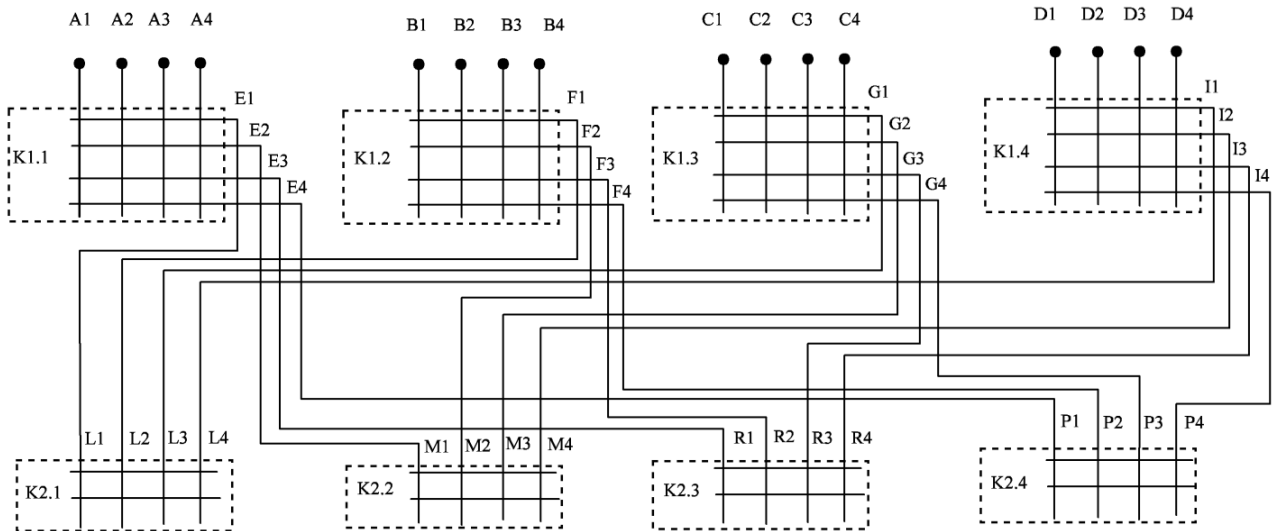


Рис. 2. Электрическая схема бесконфликтной, отказоустойчивой и компактной ПКС на 16 внешних выводов

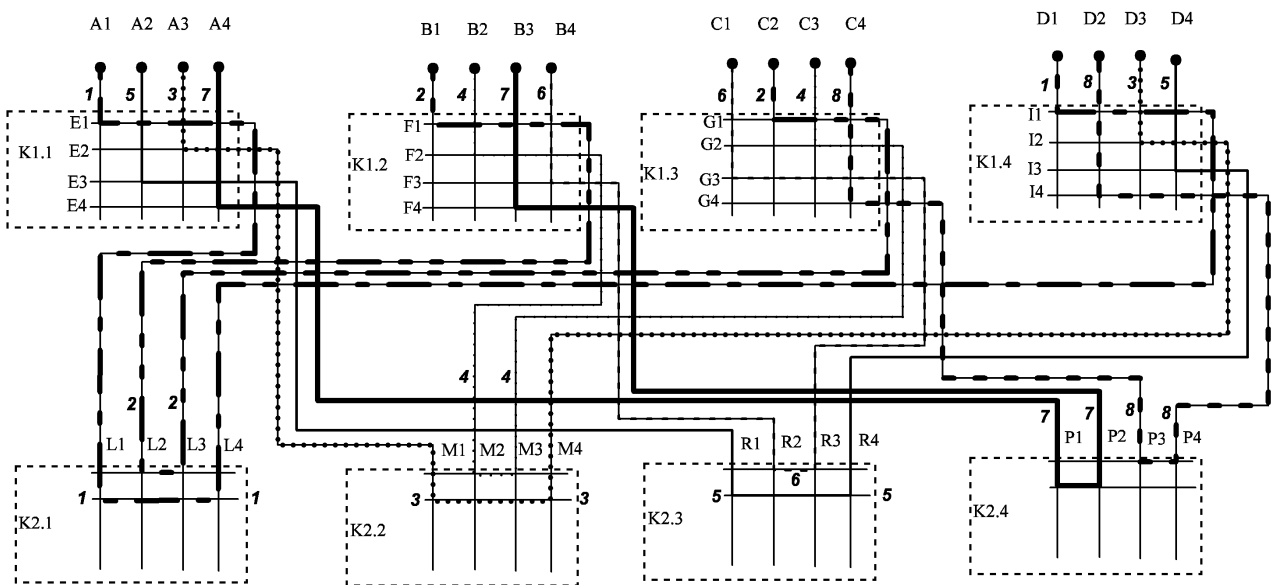


Рис. 3. Пример выполнения 8 электрических цепей, содержащих по два вывода

На рис. 3 показан один из возможных вариантов реализации 8 электрических цепей по принципу «точка–точка» на множестве из 16 внешних выводов, т.е. рассматривается вариант со 100% использованием ресурсов коммутатора по количеству реализуемых цепей. Для более наглядного представления все цепи показаны разными линиями и помечены цифрами. Цепь A1-D1 показана штрих-пунктирной линией и отмечена цифрой – 1; цепь B1-C2 – штрих-пунктирной линией с двумя точками – 2; цепь A3-D3 – точечной линией – 3; цепь B2-C3 – точечной разреженной линией – 4; цепь A2-D4 – сплошной тонкой линией – 5; цепь B4-C1 – штриховой линией – 6; цепь A4-B3 – толстой сплошной линией – 7 и цепь C4-D2 – штриховой линией (короткие штрихи) – 8.

Нетрудно заметить, что возможна реализация нескольких различных вариантов линий связи для соединения указанных выше внешних выводов. На основании теоремы Холла о паросочетаниях [13] можно утверждать, что данная электрическая схема коммутатора является бесконфликтной, т.е. на нем

всегда могут быть реализованы любые 8 электрических цепей, содержащих по 2 вывода. Следует отметить, что при реализации меньшего количества соединений проблема нахождения электрических связей оказывается проще.

На рис. 4 представлен еще один вариант выполнения тех же самых электрических соединений, которые показаны на рис. 3. Отличие состоит в изменении соединительных линий в первом коммутаторе второй группы K2.1. Цепь A1-D1 (1) выполнена на первой горизонтальной шине этого коммутатора, а цепь B1-C2 (4) – на второй горизонтальной шине этого же коммутатора.

Такой вариант выполнения соединений может потребоваться, если, например, ключевой элемент первой горизонтальной и второй вертикальной линии первого коммутатора второй группы K2.1 выйдет из строя. Вариантов выполнения указанных соединений может быть $N/2$. Этим обеспечивается отказоустойчивость схемы.

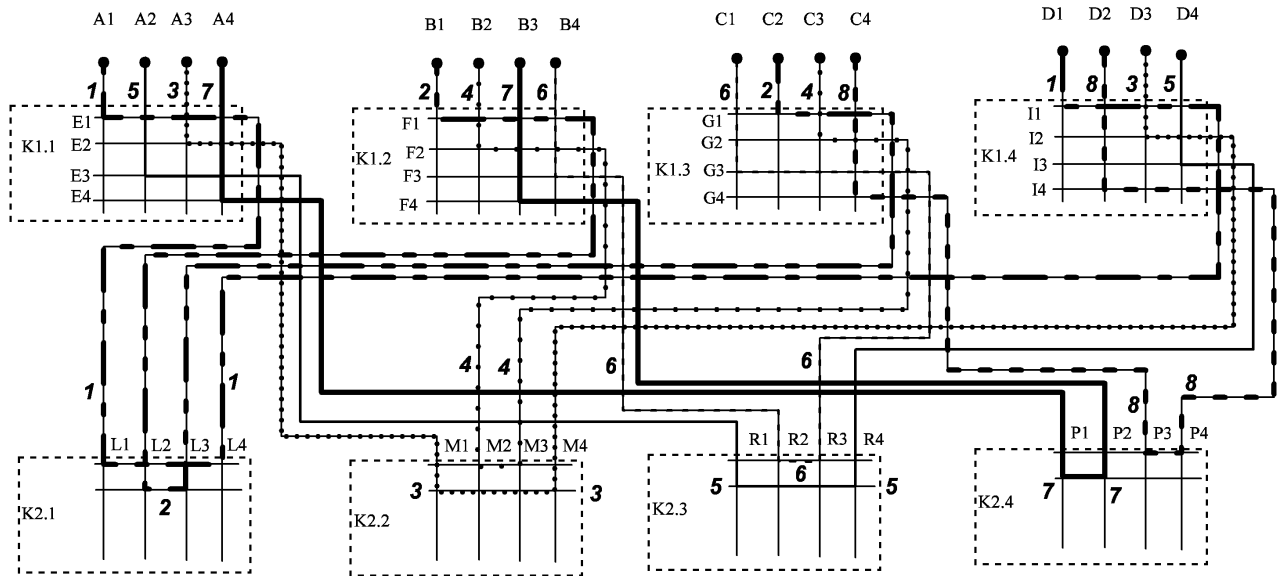


Рис. 4. Второй вариант выполнения электрических соединений, показанных на рис. 3

Количество ключей в предлагаемом коммутаторе равно

$$C_1 = n \cdot (n \cdot n) + n \cdot \left(\frac{n \cdot n}{2}\right) = 1,5n^3, \quad (2)$$

где n – количество внешних выводов уменьшенных матричных коммутаторов, N – количество внешних выводов обычного матричного коммутатора.

С учетом того, что

$$n = \sqrt{N}, \quad (3)$$

получаем:

$$C_1 = \frac{3}{2} \sqrt{N^3}. \quad (4)$$

Количество ключей в матричном коммутаторе аналогичной размерности, содержащем N внешних выводов, равно

$$C_2 = N \cdot \left(\frac{N}{2}\right) = \frac{N^2}{2}. \quad (5)$$

Используя выражения (4) и (5), найдем коэффициент уменьшения избыточности

$$C = \frac{C_2}{C_1} = \frac{\frac{N^2}{2}}{\frac{3}{2} \sqrt{N^3}} = \frac{\sqrt{N}}{3}. \quad (6)$$

Графическая зависимость параметра C от количества внешних выводов N , рассчитанная по формуле (6) представлена на рис. 5.

Из графика следует, что при увеличении количества внешних выводов N относительное сокращение объема аппаратуры увеличивается. Это позволяет уменьшить размеры кристалла, увеличить надежность и снизить потребляемую мощность предложенного коммутатора.

Заключение

Предлагаемая электрическая схема коммутатора является бесконфликтной и отказоустойчивой, так как между любыми двумя выводами существует $N/2$

различных линий связи. Во всех аналогах между любыми двумя выводами существует только один путь. Предложенный подход может быть реализован для любого другого количества внешних выводов (абонентов), при этом в электрической схеме коммутатора общее количество ключей и схем управления ключами по сравнению с матричным коммутатором такой же размерности уменьшается в $\sqrt{N}/3$.

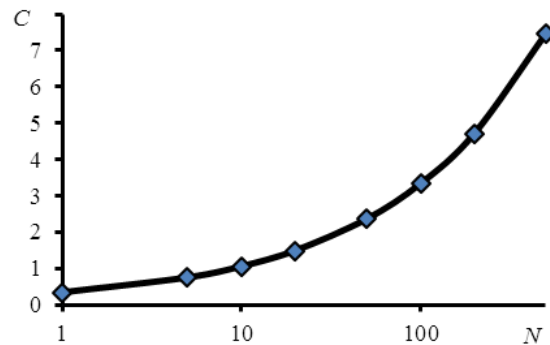


Рис. 5. График зависимости параметра C от количества внешних выводов N

На базе предлагаемого коммутатора становится возможной разработка бесконфликтной, отказоустойчивой и компактной системы коммутации размерностью $(N \times N)$ и кросс-бара на N внешних выводов (абонентов).

Литература

1. Журавлев В. SpaceWire: Взгляд со стороны. – Ч. 1 / В. Журавлев, А. Немытов, А. Першин // Современная электроника. – 2017. – № 8. – С. 36–42.
2. Журавлев В. SpaceWire: Взгляд со стороны. – Ч. 2 / В. Журавлев, А. Немытов, А. Першин // Современная электроника. – 2017. – № 9. – С. 26–32.
3. Горбунов С.Ф. Сетевые интерфейсы космических аппаратов: перспективы развития и проблемы внедрения /

С.Ф. Горбунов, В.Ю. Гришин, П.М. Еремеев // *Наноиндустрия: спецвып.* – М.: Техносфера, 2019 (89). – С. 128–130.

4. Rajamony R. PERCS: The IBM POWER7-IH high-performance computing system / R. Rajamony, L.B. Arimilli, K. Gildea // *IBM Journal of Research and Development.* – 2011. – Vol. 55, No. 3. – P. 3:1–3:12.

5. Resch M. High performance computing on vector system 2008 / M. Resch, R. Sabine, K. Benkert, M. Galle, W. Bez, H. Kobayashi, T. Hirayama. – Springer, 2009. – 241 p.

6. Новая разработка Ростеха позволяет создавать суперкомпьютеры в домашних условиях [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://rostec.ru/news/novaya-razrabotka-rostekha-pozvolit-sozdavat-superkompyutery-v-domashnikh-usloviyakh/>, свободный (дата обращения: 16.10.2020).

7. Каравай М.Ф. Расширение коммутационных возможностей сети «Ангара» / М.Ф. Каравай, В.С. Подлазов // *Матер. 12-й мультиконф. по проблемам управления (МКПУ–2019, Дивноморское, Геленджик).* – Ростов н/Д; – Таганрог: Южный фед. ун-т (Таганрог), 2019. – № 3. – С. 54–56.

8. Подлазов В.С. Расширение возможностей системной сети «Ангара» / В.С. Подлазов, М.Ф. Каравай // *Труды 13-го Всерос. совещания по проблемам управления (ВСПУ XIII, Москва, 2019).* – М.: ИПУ РАН, 2019. – С. 2440–2444.

9. Системная сеть с малым диаметром из малопортowych маршрутизаторов / М.Ф. Каравай, В.С. Подлазов // *Управление большими системами: сборник трудов (ИФРИНЦ 0,661).* – 2015. – № 56. – С. 201–210.

10. Пат. 2402061 РФ, МПК G 06 F 7/00. Пространственная коммутационная среда (варианты) / О.Х. Ким, Я.С. Пеккер, А.И. Солдатов, Д.М. Ким (РФ). – № 2402061; заявл. 16.03.09; опубл. 20.10.10, Бюл. № 29. – 4 с.

11. Солдатов А.И. Технические и алгоритмические проблемы коммутации современной электроники / А.И. Солдатов, О.Х. Ким // *Изв. высш. учеб. заведений. Физика.* – 2010. – Т. 53, № 9/3. – С. 308–311.

12. Солдатов А.И. Программируемая коммутационная среда / А.И. Солдатов, А.Ю. Матросова, О.Х. Ким, А.А. Солдатов, М.А. Костина // *Вестник Том. гос. ун-та. Управление, вычислительная техника и информатика.* – 2020. – № 50. – С. 114–122.

13. Romanowicz E. The Hall marriage theorem / E. Romanowicz, A. Grabowski // *Formalized Mathematics.* – 2004. – Vol. 12, Iss. 3. – P. 315–320.

Солдатов Алексей Иванович

Д-р техн. наук, проф. отд. электронной инженерии (ОЭИ) Национального исследовательского Томского политехнического ун-та (НИ ТПУ) Ленина пр-т, 30, г. Томск, Россия, 634050, Д-р техн. наук, проф. каф. управления инновациями (УИ) Томского государственного ун-та систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050, ORCID: 0000-0003-1892-1644 Тел.: +7 (382-2) 60-62-97 Эл. почта: asoldatof@mail.ru

Ким Олег Хонбинович

Техник каф. УИ ТУСУРа Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050, Тел.: +7 (382-2) 71-17-38 Эл. почта: oh.kim@yandex.ru

Солдатов Андрей Алексеевич

Канд. техн. наук, доцент ОЭИ НИ ТПУ Ленина пр-т, 30, г. Томск, Россия, 634050, Канд. техн. наук, доцент каф. УИ ТУСУРа Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050, ORCID: 0000-0003-0696-716X Тел.: +7 (382-2) 60-62-97 Эл. почта: soldatov.88@bk.ru

Костина Мария Алексеевна

Канд. техн. наук, доцент ОЭИ НИ ТПУ Ленина пр-т, 30, г. Томск, Россия, 634050, Канд. техн. наук, доцент каф. УИ ТУСУРа Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050, ORCID: 0000-0000-2626-6002 Тел.: +7 (382-2) 70-17-38 Эл. почта: mashenkasoldatova@mail.ru

Нариманова Гуфана Нурлабековна

Канд. техн. наук, доцент, зав. каф. УИ ТУСУРа Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050, ORCID: 0000-0002-0885-9480 Тел.: +7 (382-2) 70-17-37 Эл. почта: guftana@mail.ru

Soldatov A.I., Kim O.H., Soldatov A.A., Kostina M.A., Narimanova G.N.

Conflict-free, fault-tolerant, and compact programmable switching unit

The article provides a technical solution for building a switching unit. Its conflict-free nature, fault tolerance, and compactness are investigated. Using the example of a 16-pin switching unit, it is shown that the proposed structure allows performing electrical connections with 100% use of external pins. Two options for implementing 8 circuits on a 16-pin switching unit are given. The fault tolerance is shown. The proposed approach to building a switching unit allows to implement a switching unit of any size with a reduced number of switch elements.

Keywords: cross-bar, cross-router, programmable switching unit (PSU), conflict-free, fault tolerance, compact.

doi: 10.21293/1818-0442-2021-24-3-12-17

References

1. Zhuravlev V., Nemytov A., A. Pershin [SpaceWire: a View from the side. Part 1]. *Modern Electronics*, 2017, no. 8, pp. 36–42 (in Russ.).
2. Zhuravlev V., Nemytov A., A. Pershin [SpaceWire: a View from the side. Part 2]. *Modern Electronics*, 2017, no. 9, pp. 26–32 (in Russ.).
3. Gorbunov S.F., Grishin V.Yu., Eremeev P.M. [Network interfaces of spacecraft: development prospects and implementation problems] *Nanoindustry. Special issue 2019 (89). Moscow Technosfera*, 2019, pp. 128–130 (in Russ.).
4. Rajamony R., Arimilli L.B., Gildea K. PERCS: The IBM POWER7-IH high-performance computing system. *IBM Journal of Research and Development*, 2011, vol. 55, no. 3, pp. 3:1–3:12.
5. Resch M., Sabine R., Benkert K., Galle M., Bez W., Kobayashi H., Hirayama T. High performance computing on vector system 2008. Springer, 2009. 241 p.
6. The new development of Rostec allows you to create super-computers «at home». Available at: <https://sdelanounas.ru/blogs/109999/>, free. (Accessed: October 16, 2020) (in Russ.).

7. Karavay M.F., Podlazov V.S. [Expanding the communication capabilities of the Angara network] / Materials of the 12th multi-conference on management problems (icpu-2019, Divnomorskoe, Gelendzhik). Rostov-on-Don – Taganrog: Southern Federal University (Taganrog), 2019, no 3, pp. 54–56 (in Russ.).

8. Podlazov V.S., Karavay M. F. [Expanding the capabilities of the angara system network]. *Proceedings of the 13th all-Russian Meeting on Management Problems* (VSPU XIII, Moscow, 2019). Moscow: IPU RAS, 2019, pp. 2440–2444 (in Russ.).

9. Karavay M. F., Podlazov V. S. [System network with a small diameter of small-port routers]. *Management of Large Systems: Collection of Works*. (If RSCI 0.661). 2015, no 56, pp. 201–210 (in Russ.).

10. Kim O.H., Pekker Ya.S., Soldatov A.I., Kim D.M. *Prostranstvennaia kommutazionnaia sreda (varianty)* [Spatial switching environment (variants)], patent RF, no. 2402061, 2009 (in Russ.).

11. Soldatov A. I., Kim O. H. [Technical and algorithmic problems of switching modern electronics]. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Physics*, 2010, vol. 53, no 9/3, pp. 308–311 (in Russ.).

12. [Programmable switching environment]. Soldatov A. I., Matrosova A. Yu., Kim O. H., Soldatov A. A., Kostina M. A. *Bulletin of Tomsk State University. Management, Computing and Computer Science*, 2020, no 50, pp. 114–122 (in Russ.).

13. Romanovich E., Grabovsky A. Hall's marriage theorem. *Formalized Mathematics*. 2004, v.12, iss 3, pp. 315–320.

Oleg H. Kim

Technician, IM Department, TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 70-17-38
Email: oh.kim@yandex.ru

Andrey A. Soldatov

Doctor of Science in Engineering,
Assistant Professor, EED, NR TPU
30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Assistant Professor, IM Department, TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0003-0696-716X
Phone: +7 (382-2) 60-62-97
Email: soldatov.88@bk.ru

Mariy A. Kostina

Doctor of Science in Engineering,
Assistant Professor, EED, NR TPU
30 Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
IM Department, TUSUR,
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0000-2626-6002
Phone: +7 (382-2) 70-17-38
Email: mashenkasoldatova@mail.ru

Gufana N. Narimanova

Doctor of Science in Engineering,
Assistant Professor, IM Department, TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0002-0885-9480
Phone: +7 (382-2) 70-17-37
Email: guftana@mail.ru

Alexey I. Soldatov

Doctor of Science in Engineering, Professor,
Electronic Engineering Division (EED),
National Research Tomsk Polytechnic University (NR TPU)
30 Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Doctor of Science in Engineering, Professor,
Innovation Management (IM) Department, Tomsk State
University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0003-1892-1644
Phone: +7 (382-2) 60-62-97
Email: asoldatof@mail.ru

**УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И ИНФОРМАТИКА**

УДК 004.056.5

Н.С. Егошин

Модель типовых угроз безопасности информации, основанная на модели информационных потоков

Процесс защиты информации подразумевает комплексный подход. Необходимо затронуть все возможные аспекты в области защиты информации, в частности, определить полный перечень угроз и в будущем использовать данный перечень угроз с конкретной системой. Важна именно полнота перечня угроз, так как при отсутствии какого-либо элемента вероятность реализации угрозы резко возрастает. Таким образом, необходимо формирование модели угроз, способной предоставить полноценный перечень угроз. Модели угроз должны стать отправными точками для проектирования будущих систем защиты компьютерных и информационных систем.

Ключевые слова: информационная безопасность, защита информации, модель угроз, информационный поток.
doi: 10.21293/1818-0442-2021-24-3-21-25

Актуальность

Проблематика исследования связана с тем, что на сегодняшний день все имеющиеся модели угроз безопасности информации носят весьма условный характер. Нет единого принципа построения модели угроз. Существуют несколько подходов, и всем им присущи принципиальные недостатки, а именно: отсутствие четкого понятия «модели угроз», разительное отличие структур и принципов функционирования моделей, способов применения модели, избыточность модели в виде слияния с моделью нарушителя и многое другое.

Наличие этих и некоторых других пробелов в существующих подходах отрицательно сказывается на эффективности работы эксперта с самой моделью и на конечном результате, обусловленном отсутствием стандартизованных итоговых оценок одной модели угроз относительно другой. Поэтому задачей настоящего исследования является создание собственной модели угроз информации.

Описание несанкционированных потоков

Принцип построения модели угроз основан на модели элементарных информационных потоков [1], а именно на понятии элементарного информационного потока, который представлен на рис. 1 и описывается тройкой

$$g = \{V_i, E_z, V_j\},$$

где V_i, V_j – множества носителей информации (множество вершин потока); E_z – множество каналов передачи информации.

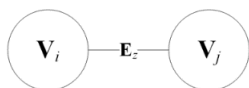


Рис. 1. Графическое представление элементарного информационного потока

Канал передачи информации – это не какой-то абстрактный, а вполне реальный объект, который обладает некоторыми физическими и/или виртуальными свойствами. Из этого следует, что к нему возможен такой же доступ, как и к двум другим элементам потока.

Обозначим и классифицируем виды воздействия. Согласно [2] несанкционированное воздействие на информацию – это воздействие на защищаемую информацию с нарушением установленных прав и (или) правил доступа, приводящее к утечке, искажению, подделке, уничтожению, блокированию доступа к информации, а также к утрате, уничтожению или сбою функционирования носителя информации.

Само определение несанкционированного доступа подразумевает появление в системе нового элемента, который будет осуществлять этот самый доступ. Используя обозначенную ранее нотацию, данную ситуацию можно изобразить следующим образом (рис. 2):

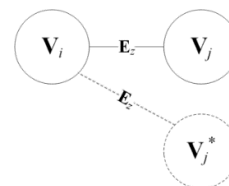


Рис. 2. Возникновение несанкционированного элемента множества V_j^* , который получает информацию из элемента V_i

Аналогичная ситуация возможна для любого элемента информационного потока. По аналогии с описанной выше ситуацией (см. рис. 2) доступ может быть осуществлен как к элементу множества V_j , так и к E_z .

Взаимодействие с элементами элементарного информационного потока приводит к угрозам нарушения целостности и доступности, а взаимодействие с информацией, циркулирующей в этом потоке, к угрозам нарушения конфиденциальности [3].

Не все авторы уделяют внимание этому обстоятельству в своих работах. В большинстве случаев говорится о состоянии безопасности информационного потока [4–6], без классификации возможных воздействий и последствий, что является необходимым ввиду разной природы происхождения воздействия [7–9].

Типовые угрозы целостности и доступности

Три возможные связи чужеродного элемента $V_j^* \rightarrow V_i, V_j^* \rightarrow V_j, V_j^* \rightarrow E_z$ описывают ситуации, при

которых оказывается непосредственное воздействие на один из элементов информационного потока, что может привести к искажению информации или её уничтожению.

Из всего вышесказанного следует, что на любой из элементов элементарного информационного потока, а значит и на информацию, может быть оказано любое из трёх видов несанкционированного воздействия:

- уничтожение;
- искажение;
- подмена.

Снова обратимся к понятию элементарного информационного потока и разберём взаимосвязь между видами воздействия на элементы потока с классическими аспектами информационной безопасности: целостностью и доступностью.

Применительно к вершинам потока:

- уничтожение информации на одной из вершин приводит к нарушению целостности информации;
- искажение информации на одной из вершин приводит к нарушению целостности информации;
- подмена информации на одной из вершин приводит к нарушению целостности информации.

Применительно к каналу передачи информации:

- уничтожение информации в канале приводит к нарушению доступности;
- искажение информации в канале приводит к нарушению целостности;
- подмена информации в канале приводит к нарушению доступности.

Итого: четыре типовые угрозы целостности и две – доступности. Необходимо обратить внимание, что информационный поток имеет две симметричные вершины, и воздействие может быть оказано на любую из них, что приводит к тому, что количество угроз целостности, направленных на вершины, вырастает вдвое, а значит, итоговое их число становится равно семи. Таким образом, разобрав все возможные виды воздействия на информационный поток, можно построить полное множество типовых угроз целостности и доступности информации.

Множество угроз целостности

$$\mathbf{C} = \{c_i | c \in \mathbf{C}\}, i = \overline{1,7},$$

где $c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7$ – типовые угрозы целостности информации.

Множество угроз доступности

$$\mathbf{D} = \{d_1, d_2\},$$

где d_1, d_2 – типовые угрозы доступности информации.

Зная, что множество элементарных информационных потоков и множество типовых угроз целостности и доступности информации конечны, сопоставим каждый элемент множеств \mathbf{C} и \mathbf{D} с каждым элементом множества \mathbf{G} и получим новое множество, которое будет состоять из всех сочетаний угроз и потоков, т.е. являться их декартовым произведением.

$$\begin{aligned} \mathbf{G} \times (\mathbf{C} \cup \mathbf{D}) = \\ = \{g_1c_1, g_1c_2, g_1c_3, g_1c_4, g_1c_5, g_1c_6, g_1c_7, g_1d_1, g_1d_2, \\ g_2c_1, g_2c_2, g_2c_3, g_2c_4, g_2c_5, g_2c_6, g_2c_7, g_2d_1, g_2d_2, \\ g_3c_1, g_3c_2, g_3c_3, g_3c_4, g_3c_5, g_3c_6, g_3c_7, g_3d_1, g_3d_2, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} g_4c_1, g_4c_2, g_4c_3, g_4c_4, g_4c_5, g_4c_6, g_4c_7, g_4d_1, g_4d_2, \\ g_5c_1, g_5c_2, g_5c_3, g_5c_4, g_5c_5, g_5c_6, g_5c_7, g_5d_1, g_5d_2, \\ g_6c_1, g_6c_2, g_6c_3, g_6c_4, g_6c_5, g_6c_6, g_6c_7, g_6d_1, g_6d_2, \\ g_7c_1, g_7c_2, g_7c_3, g_7c_4, g_7c_5, g_7c_6, g_7c_7, g_7d_1, g_7d_2, \\ g_8c_1, g_8c_2, g_8c_3, g_8c_4, g_8c_5, g_8c_6, g_8c_7, g_8d_1, g_8d_2\}. \end{aligned}$$

Посчитаем мощность итогового множества.

$$|\mathbf{G}| * (|\mathbf{C}| + |\mathbf{D}|) = 8 * (7+2) = 72.$$

Из этого следует, что множество типовых угроз целостности и доступности информации в системе можно свести к конечному множеству типовых угроз, мощность которого равна семидесяти двум.

Типовые угрозы конфиденциальности

Если говорить исключительно о конфиденциальности информации, то по определению её нарушение не подразумевает нарушения целостности или доступности, хотя и может к этому привести [2]. Из определения информационного потока следует, что нарушение конфиденциальности происходит при подмене любого из его элементов, т.е. возможны следующие случаи:

- подмена любой из двух вершин;
- подмена канала.

При этом возможны ситуации, когда будут скомпрометированы сразу несколько элементов. Теперь, зная общее количество элементов и количество состояний этих элементов, можно посчитать общее количество состояний элементарного информационного потока.

Для этого применим формулу расчета мощности множества

$$N = p^i,$$

где p – количество состояний элемента; i – количество элементов.

В нашем случае $p = 2$, так как любой элемент потока может иметь два состояния – скомпрометирован или нет, а $i = 3$, так как элементарный информационный поток состоит из трёх элементов [10]. В итоге общее количество завязанных на компрометации элементов состояний элементарного информационного потока будет равняться восьми. Однако при построении модели угроз нет необходимости рассматривать составные варианты компоновки, так как такой подход приведёт к высокому уровню дублирования различных угроз, потому достаточным будет рассмотрение только четырёх базовых состояний: скомпрометирован один из элементов множества \mathbf{V} , элемент \mathbf{E} или ни один из элементов.

Необходимо отдельно разобрать ситуацию, когда ни один из элементов системы не является скомпрометированным. Дело в том, что помимо простой подмены возможна ситуация так называемой «прослушки» элемента, т.е. доступ к хранимой в нём информации из-за пределов контролируемой зоны. Однако «прослушка» уже не будет применима ко всем трём элементам, так как слежение за вершиной подразумевает либо внедрение в уже существующий канал передачи информации, что тождественно прослушиванию канала, либо возникновение нового неразрешенного, что совпадает с подменой канала, и всё же остается вариант, когда скомпрометирована может быть уже вся система целиком.

Таким образом, разобрав все возможные виды вмешательства в информационный поток, построим полное множество типовых угроз конфиденциальности информации.

Обозначим множество типовых угроз конфиденциальности

$$\mathbf{K} = \{k_1, k_2, k_3, k_4\},$$

где k_1, k_2, k_3, k_4 – типовые угрозы конфиденциальности информации.

По аналогии с моделью типовых угроз целостности и доступности информации соотнесем каждую типовую угрозу конфиденциальности с каждым элементарным информационным потоком, т.е. построим декартово произведение множеств \mathbf{K} и \mathbf{G} и посчитаем итоговую мощность этого множества.

$$\mathbf{G} \times \mathbf{K} = \{g_1k_1, g_1k_2, g_1k_3, g_1k_4, \\ g_2k_1, g_2k_2, g_2k_3, g_2k_4, \\ g_3k_1, g_3k_2, g_3k_3, g_3k_4, \\ g_4k_1, g_4k_2, g_4k_3, g_4k_4, \\ g_5k_1, g_5k_2, g_5k_3, g_5k_4, \\ g_6k_1, g_6k_2, g_6k_3, g_6k_4, \\ g_7k_1, g_7k_2, g_7k_3, g_7k_4, \\ g_8k_1, g_8k_2, g_8k_3, g_8k_4\};$$

$$|\mathbf{G} \times \mathbf{K}| = |\mathbf{G}| * |\mathbf{K}| = 8 * 4 = 32.$$

Из этого следует, что множество типовых угроз конфиденциальности информации в системе можно свести к конечному множеству типовых угроз, мощность которого равна тридцати двум.

Модель угроз и сравнение с аналогами

Несмотря на то, что описанные в предыдущих пунктах модели угроз имеют разное обоснование полноты, в их основе всё же лежит одинаковый математический аппарат. Благодаря этому результирующие угрозы могут быть объединены в общее множество угроз. Итоговая мощность множества типовых угроз будет равняться сумме мощностей двух множеств, а значит, общее количество типовых угроз по всем трём аспектам будет равняться 104.

Учитывая тот факт, что технологии развиваются нарастающими темпами, мы не можем с точностью предсказать, какие устройства ввода/вывода, хранения или передачи информации в принципе будут существовать через несколько лет. Тем более вряд ли можно рассчитывать на составление полного перечня угроз информации, которая будет обрабатываться с помощью ныне несуществующих приборов.

При всём этом можно с уверенностью сказать, что множество типовых угроз останется неизменным, так как используемый в основе модели угроз аппарат имеет высокую степень абстракции и строится на теории графов, а не на объектах реального мира. В рамках модели любое устройство представляется как канал передачи информации независимо от своей реализации. От специалиста потребуется только обеспечить добавление этого канала (устройства) на этапе описания всей системы. Внедренная абстракция позволяет описать систему вплоть до минимального уровня взаимодействия элементов [11]. Глубину детального описания системы специалист определяет самостоятельно в зависимости от целесообразности

и предъявляемых требований [12]. Однако на данном этапе не идет речи об автоматизации процесса формирования полного перечня угроз, так как перечень актуальных угроз бесконечно дополняется и такая задача является попросту невыполнимой [13]. Данное исследование предполагает определение только типовых угроз.

Из проведенного в [14] анализа моделей угроз следует, что перечень угроз из [15] перекрывает все угрозы, обозначенные в остальных моделях. Следовательно, дальнейшее сравнение результатов настоящего исследования будет производиться именно с [15].

Учитывая специфику исследования, а именно обеспечение безопасности информации, обрабатываемой в системе, было произведено сопоставление выделенных из [15] угроз информации с типовыми угрозами, представленными в авторской модели.

По итогам сопоставления всем угрозам из [15] удалось определить соответствующие угрозы из авторской модели. Однако составить полное соотношение не удалось: не для каждой типовой угрозы из авторской модели нашлись угрозы из [15]. В [15] нет примеров для следующих типовых угроз:

- g_{1c4} – уничтожение информации, обрабатываемой пользователем;
- g_{1c5} – подмена информации, обрабатываемой процессом;
- g_{1c6} – подмена информации, обрабатываемой пользователем;
- g_{2c2} – передача н/с процессом информации санкционированному пользователю;
- g_{3c1} – передача н/с процессом информации санкционированному процессу;
- g_{3c2} – передача н/с процессом информации санкционированному процессу;
- g_{3c5} – подмена информации, обрабатываемой процессом;
- g_{3c6} – подмена информации, обрабатываемой процессом;
- g_{3c7} – воздействие на информацию при ее передаче по каналу в электромагнитной среде;
- g_{5c6} – подмена информации, обрабатываемой процессом;
- g_{5c7} – воздействие на информацию при ее передаче по каналу в электромагнитной среде;
- g_{7c6} – подмена информации, хранящейся на носителе информации;
- g_{7c7} – воздействие на информацию при ее передаче по каналу в электромагнитной среде.

Все обнаруженные пробелы относятся к угрозам целостности, при этом большая их часть относится к потокам g_1, g_3, g_5 и g_7 , в которых передача информации осуществляется по электромагнитному каналу.

В модели угроз ФСТЭК были угрозы, которые могли бы подойти указанным типовым угрозам, однако они были отвергнуты в виду того, что в их описании было явно указано, что данная угроза вызвана программно и/или направлена на объект в виртуальной среде. К тому же модель ФСТЭК не учитывает деление канала передачи информации на виртуаль-

ный и электромагнитный, но делит на такие классы носители информации. Ещё одной проблемой является то, что модель ФСТЭК не учитывает направленность угрозы, что вызывает большое количество дублированных при сопоставлении моделей.

Заключение

В ходе исследования была разработана и предложена модель типовых угроз конфиденциальности, целостности и доступности информации, которая учитывает модель элементарных информационных потоков и позволяет классифицировать угрозы по направленности на каждую из трёх составляющих элементарного информационного потока.

Сравнение разработанной модели с наиболее полной базой угроз позволило выделить ещё 13 типовых угроз.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках базовой части государственного задания ТУСУРА на 2020–2022 гг. (проект № FEWM-2020-0037).

Литература

1. Новохрестов А.К. Модель угроз безопасности информации и её носителей / А.К. Новохрестов, А.А. Конев, А.А. Шелупанов, Н.С. Егошин // Вестник Иркут. гос. техн. ун-та. – 2017. – Т. 21, № 10. – С. 93–104.

2. Загинайлов Ю.Н. Теория информационной безопасности и методология защиты информации: учеб. пособие. – Москва; Берлин: Директ-Медиа, 2015. – 253 с.

3. Конев А.А. Подход к построению модели угроз защищаемой информации // Доклады ТУСУР. – 2012. – № 1 (25). – С. 34–39.

4. Тарасенко А.И. Критерии оценки эффективности обеспечения информационной безопасности при управлении информационными потоками на основе динамических приоритетов // Science Time. – 2016. – № 4. – С. 816–825.

5. Верешник А.В. Способ защиты информационных потоков в многооператорных информационно-телекоммуникационных сетях / А.В. Верешник, В.Г. Федоров, А.В. Попова // Матер. IV Всерос. науч.-практ. конф. «Современные информационные технологии. Теория и практика». – Череповец: Изд-во Череп. гос. ун-та. – 2018. – С. 154–158.

6. Десницкий В.А. Реализация средств верификации сетевых информационных потоков с использованием метода «Проверка на модели» // Матер. 9-й конф. по проблемам управления «Информационные технологии в управлении». – СПб.: Концерн «Центральный научно-исследовательский институт «Электроприбор». – 2016. – С. 680–683.

7. Mouna Jouini, Latifa Ben Arfa – Threat classification: State of art. – May 2016 // Handbook of Research on Modern Cryptographic Solutions for Computer and Cyber Security [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/313241139_Threat_classification_State_of_art, свободный (дата обращения: 22.09.2021).

8. Ruf L. Threat Modeling in Security Architecture – the Nature of Threats / L. Ruf, A. Thorn, T. Christen, B. Gruber, R. Portmann, H. Luzer // ISSS Working Group on Security Architectures [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://scribd.com/document/47730732/ISSS-AG-Security-Architecture-Threat-Modeling-Lukas-Ruf>, свободный (дата обращения: 22.09.2021).

9. Geric S., Hutinski Z. Information system security threats classifications // Journal of Information and Organizational Sciences. – 2007. – P. 31–51 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/26596385_Information_system_security_threats_classifications, свободный (дата обращения: 22.09.2021).

10. Ануфриенко С.А. Введение в теорию множеств и комбинаторику: учеб. пособие. – Екатеринбург: УрГУ, 1998. – 62 с.

11. Егошин Н.С. Модель угроз безопасности информации, передаваемой через Интернет / Н.С. Егошин, А.А. Конев, А.А. Шелупанов // Информатика и безопасность. – 2018. – Т. 21, № 4. – С. 530–533.

12. Новохрестов А.К. Оценка качества защищенности компьютерных сетей / А.К. Новохрестов, А.А. Конев // Динамика систем, механизмов и машин. – 2014. – № 4. – С. 85–87.

13. Шелупанов А.А. Актуальные направления развития методов и средств защиты информации / А.А. Шелупанов, О.О. Евсютин, А.А. Конев, Е.Ю. Костюченко, Д.В. Кручинин, Д.С. Никифоров // Доклады ТУСУР. – 2017. – Т. 20, № 3. – С. 11–24.

14. Новохрестов А.К. Обзор подходов к построению моделей информационной системы и угроз ее безопасности / А.К. Новохрестов, А.А. Конев // Актуальные проблемы обеспечения информационной безопасности: Тр. межвуз. науч.-практ. конф. – Самара: Инсома-Пресс, 2017. – С. 151–155.

15. Банк данных угроз безопасности информации. ФСТЭК России [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://bdu.fstec.ru> (дата обращения: 22.09.2021).

Егошин Николай Сергеевич

Ст. преп. каф. комплексной информационной безопасности электронно-вычислительных систем (КИБЭВС) Томского университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) Красноармейская ул., 146, г. Томск, Россия, 634034
ORCID: 0000-0003-4770-0701
Тел.: +7-961-095-54-18
Эл. почта: ens@fb.tusur.ru

Egoshin N.S.

Model of typical threats to information security based on the model of information flows

The information security process involves an integrated approach. It is necessary to cover all possible aspects in the field of information protection to define a complete list of threats and in the future use this list of threats according to a specific system. It is important to make it more complete possible, since if ever it is missing any element, the chances for the threats to appear increase dramatically. Thus, it is necessary to form a threat model allowing to provide a complete list of threats. The threat models should become the starting points for the design of future security systems for computer and information systems.

Keywords: information security, information protection, threat model, information flow.

doi: 10.21293/1818-0442-2021-24-3-21-25

References

1. Novokhrestov A.K., Konev A.A., Shelupanov A.A., Egoшин N.S. [Information and information carrier security threat model]. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*, 2014, vol. 21, no. 10, pp. 93–94 (in Russ.).
2. Zaginaylov Yu.N. *Teoria informacionnoy bezopasnosti I metodologii zashiti informacii: uchebnoe posobie* [Information security theory and information security methodology: a tutorial]. M. Berlin: Direct-Media, 2015, 253 p. (in Russ.).
3. Konev A.A. [Approach to creation protected information model]. *Proceedings of TUSUR University*, 2012, no. 1-2 (25), pp. 34–39 (in Russ.).
4. Tarasenko A.I. *Kriterii ocenki effektivnosti obespecheniya informacionnoy bezopasnosti pri upravlenii informacionnymi potokami na osnove dinamicheskikh prioritetov* [Criteria for assessing the effectiveness of information security in managing information flows based on dynamic priorities]. *Science Time*, 2016, no. 4, pp. 816–825 (in Russ.).
5. Vershnik A.V., Fedorov V.G., Popova A.V. [Method of protecting information flows in multi-operator information and telecommunication networks]. *Materials of the IV All-Russian Scientific and Practical Conference «Modern Information Technologies. Theory and practice»* Cherepovets: Cherepovets State University, 2018, pp. 154–158 (in Russ.).
6. Desnickiy V.A. [Implementation of verification tools for network information flows using the «Model check» method]. *Materials of the 9th Conference on Management Problems «Information Technologies in Management»*, St. Petersburg: Concern «Central Research Institute Electropribor», 2016, pp. 680–683 (in Russ.).
7. Mouna Jouini, Latifa Ben Arfa. Threat classification: State of art. *Handbook of Research on Modern Cryptographic Solutions for Computer and Cyber Security*, 2016. – Available at: https://www.researchgate.net/publication/313241139_Threat_classification_State_of_art, free (Accessed: September 22, 2021).
8. Ruf L., Thorn A., Christen T., Gruber B., Portmann R., Luzer H. Threat Modeling in Security Architecture - The Nature of Threats. *ISSS Working Group on Security Architectures*. Available at: <https://scribd.com/document/47730732/ISSS-AG-Security-Architecture-Threat-Modeling-Lukas-Ruf>, free (Accessed: September 22, 2021).
9. Geric S, Hutinski Z. Information system security threats classifications. *Journal of Information and Organizational Sciences*, 2007, vol. 31, no. 1. Available at: <https://jios.foi.hr/index.php/jios/article/view/29>, free (Accessed: September 22, 2021).
10. Anufrienko S.A. *Vvedenie v teoriyu mnozhestv I kombinatoriku: uchebnoe posobie* [Introduction to set theory and combinatorics: tutorial]. Ekb., 1998, 62 p. (in Russ.).
11. Egoшин N.S., Konev A.A., Shelupanov A.A. [Security threats model of information transmitted by internet]. *International Scientific Conference on Electronic Devices and Control Systems*, 2018, vol. 21, no. 4, pp. 530–533 (in Russ.).
12. Novokhrestov A.K., Konev A.A. [Assessment the quality of computer network security]. *Dinamica system, mekhanizmov i mashin*, 2014, no. 4, pp. 85–87 (in Russ.).
13. Shelupanov A.A., Evsutin O.O., Konev A.A., Kostychenko E.Yu., Kruchinin D.V., Nikiforov D.S. [Modern trends in development of methods and means for information protection]. *Proceedings of TUSUR University*, 2017, vol. 20, no. 3, pp. 11–24.
14. Novokhrestov A.K., Konev A.A. [Review of approaches to building models of an information system and threats to its security]. *Actual problems of information security: Proceedings of the Interuniversity Scientific and Practical Conference*, Samara: Insoma-Press, 2017, pp. 151–155 (in Russ.).
15. Databank of information security threats. FSTEC of Russia – Available at: <http://bdu.fstec.ru/>, free. (Accessed: September 22, 2021).

Nikolay S. Egoшин

Senior Lecturer of Department of Complex Information Security of Computer Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics
146, Krasnoarmeyskaya st., Tomsk, Russia, 634034
ORCID: 0000-0003-4770-0701
Phone: +7-961-095-54-18
Email: ens@fb.tusur.ru

УДК 004.85

М.А. Сивак, В.С. Тимофеев

Настройка робастных нейронных сетей для решения задачи классификации

Рассматривается задача построения и настройки устойчивых к выбросам нейронных сетей. Для построения моделей используются различные робастные функции потерь Коши, Мешалкина, Geman–McCluer, Charbonnier и биквадратная функция потерь Тьюки. Исследования точности работы сетей проводились при различных значениях доли засоряющих наблюдений, различном числе эпох и различном объеме набора данных. Для каждой функции определены значения параметров, при которых достигается наилучшая точность работы, а также рекомендуемые интервалы значений параметра в зависимости от числа эпох обучения нейронной сети. Для сравнения рассматривались также классическая ИНС (с квадратичной функцией потерь) и робастная ИНС с функцией потерь Хьюбера. Анализ результатов показал, что использование робастного подхода дает значительный выигрыш в точности работы и в скорости обучения нейронной сети, однако выбор значения параметра функции потерь за пределами рекомендуемых интервалов может привести к ухудшению точности работы робастной сети.

Ключевые слова: искусственная нейронная сеть, алгоритм обратного распространения ошибки, выбросы, вычислительный эксперимент, робастный подход, функция потерь, машинное обучение, задача классификации.

doi: 10.21293/1818-0442-2021-24-3-26-32

Искусственные нейронные сети (ИНС) представляют собой один из наиболее популярных инструментов машинного обучения с учителем. Они применяются для решения разного рода задач, таких как задачи управления, прогнозирования или классификации. Однако при решении практических задач зачастую оказывается так, что данные содержат в себе нетипичные наблюдения (выбросы). Как правило, это отрицательным образом сказывается на точности работы нейронной сети [1–3].

Существует несколько способов решения этой проблемы. Наиболее популярные из них сводятся или к усложнению архитектуры используемой ИНС, или к предварительной обработке данных с целью исключения нетипичных наблюдений. Однако первый подход может привести к возникновению дополнительных затрат на вычислительные ресурсы, а второй – к потере важной информации.

Кроме того, можно использовать робастный подход [4, 5], который позволит не исключать выбросы, но снизить их негативное влияние при обучении нейронной сети. В [6] авторами сделана первая попытка использовать такой подход, чтобы получить нейронные сети, обладающие новыми свойствами. Рассматривались функции потерь Хьюбера, Уэлша, Эндрюса, Рамсея и «Fair». Проведенные исследования показали, что робастные ИНС способны дать значительный выигрыш в точности работы по сравнению с классической сетью, построенной с использованием квадратичной функции потерь. В настоящей работе предлагаются к рассмотрению еще несколько робастных функций потерь, а также модели, полученные с использованием этих функций.

Постановка задачи

Рассмотрим задачу обучения искусственной нейронной сети с простой архитектурой. Такая сеть включает в себя входной слой, выходной слой и один или несколько скрытых слоев. Введем следующие обозначения: N – число слоев нейронной сети,

$x_i, i = 1, \dots, T$ – значения, которые подаются на вход сети, $y_k, k = 1, \dots, Y$ – значения на выходном слое нейронной сети, $w_{ij}^{(n-1)}, i = 1, \dots, l^{(n-1)}, j = 1, \dots, l^{(n)}$ – вес между j -м нейроном слоя n и i -м нейроном слоя $n-1$ ($l^{(n)}$ – количество нейронов на слое n). Кроме того, обозначим через $o_j^{(n)}$ – выходное значение j -го нейрона на слое n , через $s_j^{(n)}$ – входное значение j -го нейрона на слое n , через $\varphi = \varphi(z)$ – функцию активации.

Классическим алгоритмом обучения нейронных сетей является алгоритм обратного распространения ошибки [7]. Обучение нейронной сети с использованием этого алгоритма предполагает решение следующей задачи оптимизации:

$$E = \sum_{j=1}^{l^{(N)}} f(t_j, y_j) \rightarrow \min_{w_{ij}^{(1)}, \dots, w_{ij}^{(N-1)}}, \quad (1)$$

где E – суммарная функция потерь, t_j – требуемое значение на j -м нейроне выходного слоя сети. Будем называть классической нейронной сетью такую сеть, в алгоритме обучения которой используется квадратичная функция потерь:

$$f(t_j, y_j) = \frac{1}{2} (y_j - t_j)^2.$$

Недостаток классической нейронной сети заключается в том, что используемая функция потерь является чувствительной к наличию нетипичных наблюдений в данных. В [6] приводятся первые результаты исследования устойчивости построенных нейронных сетей к выбросам. В рамках текущей работы будут получены новые робастные сети, будет выполнена их настройка для решения задачи классификации. Кроме того, будет проведено сравнение моделей, полученных в рамках этой работы, с моделями, полученными в [6].

Робастная модификация алгоритма обучения

Для решения задачи (1) требуется вычислить производную суммарной функции потерь по весам нейронной сети, поэтому в алгоритме обратного распространения ошибки желательно использовать непрерывно дифференцируемую функцию потерь. В данной работе рассматриваются пять робастных функций потерь $f_R(t_j, y_j)$ [7–9], которые удовлетворяют этому условию (β – параметр робастной функции потерь, принимающий неотрицательные значения):

1. Биквадратная функция потерь Тьюки:

$$f_R(t_j, y_j) = \begin{cases} \frac{(y_j - t_j)^6}{6\beta^4} - \frac{(y_j - t_j)^4}{2\beta^2} + \frac{(y_j - t_j)^2}{2}, & |y_j - t_j| < \beta, \\ \frac{\beta^2}{6}, & |y_j - t_j| \geq \beta. \end{cases}$$

2. Функция потерь Коши:

$$f_R(t_j, y_j) = \ln\left(\frac{1}{2}\left(\frac{y_j - t_j}{\beta}\right)^2 + 1\right).$$

3. Функция потерь Geman–McCluer:

$$f_R(t_j, y_j) = \frac{(y_j - t_j)^2}{\beta + (y_j - t_j)^2}.$$

4. Функция потерь Charbonnier:

$$f_R(t_j, y_j) = \sqrt{\left(\frac{y_j - t_j}{\beta}\right)^2 + 1}.$$

5. Функция потерь Мешалкина:

$$f_R(t_j, y_j) = \beta^{-1} \left(1 - \exp\left(-\frac{\beta(y_j - t_j)^2}{2}\right)\right).$$

Анализ выбранных функций был ранее представлен в [10] – были получены их производные и сделаны выводы о возможности применения этих функций при построении робастных нейронных сетей.

Опуская подробное описание всех шагов алгоритма, представленное в [11], приведем лишь конечное соотношение для вычисления частной производной суммарной функции потерь:

$$\frac{\partial E}{\partial w_{ij}^{(n-1)}} = \delta_j^{(n)} o_i^{(n-1)},$$

где $\delta_j^{(n)}$ при замене квадратичной функции потерь на робастную будет вычисляться следующим образом:

$$\delta_j^{(n)} = \frac{\partial E}{\partial o_j^{(n)}} \frac{\partial o_j^{(n)}}{\partial s_j^{(n)}} = \begin{cases} \frac{\partial f_R(y_j, t_j)}{\partial y_j} \varphi'(y_j), & n = N, \\ \left(\sum_{k=1}^{l^{(n+1)}} w_{jk}^{(n)} \delta_k^{(n+1)} \right) \varphi'(s_j^{(n)}), & \text{иначе.} \end{cases}$$

Искусственные нейронные сети, обучение которых проводилось с помощью робастной модификации алгоритма обратного распространения ошибки, представляют собой класс абсолютно новых

нейронных сетей, в связи с чем возникает необходимость в исследовании их свойств. Далее в работе приводятся наилучшие значения параметров робастных функций потерь, полученные в ходе настройки сетей, а также результаты исследования устойчивости построенных моделей к наличию выбросов.

Результаты исследований

В рамках данной работы исследования проводились в три этапа. На первых двух этапах использовался набор данных «Ирисы Фишера» [12], состоящий из 150 объектов $X_m, m = 1, \dots, 150$, описывающихся четырьмя признаками $x_{mi}, i = 1, \dots, 4$. Все имеющиеся объекты делятся на три сбалансированных класса $y_k, k = 1, \dots, 3$. Выбранный набор данных был разделен на обучающую и тестовую выборки, причем обучающая выборка $L = \{X_1, \dots, X_{|L|}\}$ включала в себя 80% объектов ($|L| = 120$ объектов – объем обучающей выборки), а тестовая выборка $D = \{X_{|L|+1}, \dots, X_{|X|}\}$ включала в себя оставшиеся 20% объектов ($|D| = 30$ объектов – объем тестовой выборки).

Исходя из конфигурации анализируемого набора данных, для исследования была выбрана однослойная нейронная сеть, имеющая следующую архитектуру. Скрытый слой сети состоял из 4 нейронов, входной слой – также из 4 нейронов (по количеству признаков объектов), выходной – из 3 нейронов (по количеству классов). В качестве функции активации $\varphi = \varphi(z)$ использовалась сигмоида [11]

$$\varphi(z) = \frac{1}{1 + e^{-z}}.$$

Поскольку в анализируемом наборе данных классы сбалансированы по объему, оценка точности работы построенных моделей проводилась только на основе метрики α [13]:

$$\alpha = \frac{D_{\text{corr}}}{|D|} 100\%,$$

где D_{corr} – количество объектов, отнесенных к правильному классу.

Набор данных «Ирисы Фишера» не является синтетическим – это означает, что данные представляют собой результат реальных измерений и могут содержать погрешности (фоновый шум). В связи с этим главным образом исследовалось влияние на работу нейронных сетей доли засоряющих наблюдений в выборке. Зашумление обучающей выборки выполнялось по третьему и четвертому признаку:

$$\tilde{x}_{mi} = x_{mi} + \varepsilon_{mi}, i = 3, 4, \tag{2}$$

где ε_{mi} – случайные, независимые, одинаково распределенные ошибки. Данные ошибки имеют следующую функцию распределения:

$$F_i(x) = (1 - \lambda)F_1(x, 0, \sigma_{i1}) + \lambda F_2(x, 0, \sigma_{i2}), i = 3, 4, \tag{3}$$

где $F_j(x, 0, \sigma_{ij}), j = 1, 2$ – функция нормального распределения с нулевым математическим ожиданием и дисперсией $\sigma_{ij}^2, \lambda \in [0, 1]$ – параметр смеси, играющий роль доли засоряющих наблюдений.

В данном исследовании задавались не сами значения дисперсий σ_{i1}^2 и σ_{i2}^2 , а соответствующие им значения уровня шума [14], причем полагалось, что $\sigma_{i1}^2 < \sigma_{i2}^2$:

$$\rho_{ij} = \frac{\sigma_{ij}}{c} 100\%,$$

где c^2 – дисперсия незашумленной выборки.

Для третьего признака дисперсия σ_{31}^2 соответствовала уровню шума $\rho_{31} = 30\%$, дисперсия σ_{32}^2 – уровню шума $\rho_{32} = 120\%$; для четвертого признака σ_{41}^2 соответствовала уровню шума $\rho_{41} = 40\%$, а σ_{42}^2 – уровню шума $\rho_{42} = 150\%$.

Первый этап исследований заключался в поиске таких значений параметра β робастных функций потерь, при которых точность работы нейронной сети была бы наилучшей. Значения параметра рассматривались на различных интервалах (β_{\min} , β_{\max}], которые определялись в ходе предварительного исследования. Для всех рассматриваемых функций потерь предварительно фиксировались левая и правая границы интервалов ($\beta_{\min} = 0,00$, $\beta_{\max} = 20,00$), шаг разбиения 0,10. При этом было зафиксировано значение доли засоряющих наблюдений $\lambda = 0,25$. Затем для каждого значения β из этого интервала проводилось по 10 вычислительных экспериментов, по результатам которых фиксировались, а затем усреднялись значения метрики α на 500 эпох обучения.

Предварительное исследование позволило скорректировать правую границу интервала для каждой функции потерь – она определялась в соответствии с тем, начиная с какого значения β точность работы сети переставала значимо изменяться. Помимо этого, был изменен шаг разбиения для функции потерь Geman–McCluer: выбранный изначально шаг оказался слишком маленьким – с каждым новым значением β при таком разбиении точность работы сети изменялась незначительно (не более чем на 0,5%). Полученные в результате предварительного исследования границы и шаг разбиения интервалов приводятся в табл. 1.

Таблица 1
Интервалы значений параметра робастных функций потерь

Функция потерь	β_{\min}	β_{\max}	Шаг
Биквадратная Тьюки	0,00	5,00	0,10
Коши	0,00	7,00	0,10
Geman–McCluer	0,00	10,00	0,50
Charbonnier	0,00	7,00	0,10
Мешалкина	0,00	5,00	0,10

Следует отметить, что для функции Geman–McCluer, помимо значений из интервала, приведенного в таблице, рассматривались также значения $\beta = \{20, 50, 100\}$, так как было отмечено улучшение точности работы нейронной сети с ростом значения параметра.

После того как были определены интервалы, на которых рассматривались значения параметра β ,

исследования проводились следующим образом. Значение доли засоряющих наблюдений λ в обучающей выборке изменялось от 0,05 до 0,40 с шагом в 0,05. Для каждого λ при всех β из указанных интервалов вычислялось значение метрики α и фиксировалось при различном числе эпох, в течение которых проходило обучение нейронной сети (50, 100 и далее до 1000 с шагом в 100 эпох). Исходя из соотношения числа эпох обучения и значения метрики α , можно судить о скорости обучения нейронной сети – чем больше значение метрики и чем меньше число эпох, тем быстрее обучается ИНС.

В ходе исследований для каждой робастной сети проводилось по 100 вычислительных экспериментов, результаты которых после усреднялись. На основании полученных результатов для каждой нейронной сети были зафиксированы наилучшие значения параметра β – такие, при которых точность классификации была максимальной. Эти значения приводятся в табл. 2 для каждого λ на 100, 300, 500 и 1000 эпох обучения.

Таблица 2
Наилучшие значения параметра робастных функций потерь

λ	h	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5
0,05	100	0,7	1,7	2,0	1,4	1,2
	300	2,9	1,6	10,0	1,8	2,4
	500	4,7	1,5	20,0	2,2	3,1
	1000	5,2	1,2	20,0	3,6	3,8
0,10	100	0,8	1,9	3,0	1,4	1,3
	300	3,0	1,3	10,0	3,2	2,6
	500	5,0	1,3	20,0	4,0	3,2
	1000	5,6	1,2	20,0	4,0	3,4
0,15	100	0,7	1,6	2,0	2,0	1,2
	300	2,8	1,3	10,0	3,2	2,5
	500	5,1	1,2	20,0	3,8	3,1
	1000	5,7	1,2	20,0	3,7	4,1
0,20	100	2,2	1,5	3,5	2,3	2,1
	300	3,3	1,3	10,0	3,3	2,7
	500	5,0	1,3	20,0	3,5	3,3
	1000	6,3	1,2	20,0	3,5	3,6
0,25	100	1,1	1,5	3,5	2,1	1,5
	300	2,7	1,3	10,0	3,3	2,4
	500	4,5	1,2	20,0	3,5	3,0
	1000	6,9	1,3	20,0	3,3	4,4
0,30	100	1,1	1,6	4,0	1,9	1,5
	300	2,4	1,3	9,5	2,8	2,2
	500	3,6	1,3	20,0	3,6	2,8
	1000	6,9	1,3	20,0	2,8	3,8
0,35	100	1,3	1,5	5,0	2,0	1,7
	300	3,1	1,3	10,0	3,3	2,4
	500	5,2	1,3	20,0	3,8	3,2
	1000	6,9	1,3	20,0	3,8	4,5
0,40	100	1,1	1,5	4,0	2,2	1,4
	300	3,0	1,3	10,0	3,5	2,5
	500	4,1	1,2	20,0	3,8	2,9
	1000	6,9	1,4	20,0	3,0	3,9

Здесь и далее в таблицах приняты следующие обозначения столбцов: h – число эпох, f_1 – функция потерь Коши, f_2 – биквадратная функция потерь Тьюки, f_3 – функция потерь Geman–McCluer, f_4 – функция потерь Мешалкина, f_5 – функция потерь Charbonnier.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что ни для одной из рассмотренных функций нет явной зависимости между значением параметра β и долей засоряющих наблюдений λ . Однако для всех функций наблюдается зависимость значения β от числа эпох обучения. Для ИНС с функциями потерь Коши, Geman–McCluer, Мешалкина и Charbonnier в целом характерен рост наилучшего значения параметра при увеличении числа эпох обучения нейронной сети. Для нейронной сети с биквадратной функцией потерь Тьюки характерно убывание значения β с ростом числа эпох.

На рис. 1 продемонстрирована полученная зависимость точности классификации от значения параметра β для нейронной сети с функции потерь Charbonnier при различном числе эпох обучения и доли засоряющих наблюдений $\lambda = 0,25$. Нетрудно заметить, что с ростом числа эпох обучений возрастает и наилучшее значение параметра функции, например, для 100 эпох $\beta = 1,5$, а для 500 эпох $\beta = 3,0$. Однако слишком большие значения параметра приводят к снижению точности работы нейронной сети.

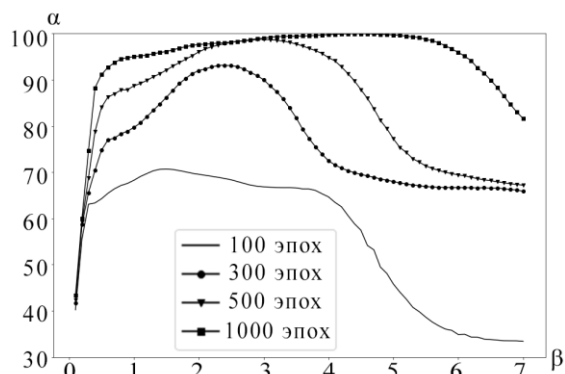


Рис. 1. Зависимость наилучшего значения параметра функции потерь Charbonnier от числа эпох обучения

В табл. 3 приводятся интервалы значений параметра β для ИНС с рассматриваемыми робастными функциями потерь, на которых точность классификации была наилучшей. На основе полученных результатов можно сформировать следующие рекомендации относительно выбора значения параметра робастных функций потерь. Для функций потерь Коши, Charbonnier и Мешалкина значение параметра следует постепенно увеличивать с ростом числа эпох, однако следует помнить о том, что слишком большие значения β могут негативно сказаться на точности классификации. Так, для функции потерь Коши не следует выбирать значения параметра больше 7,0, для функции потерь Charbonnier – больше 4,5, для функции потерь Мешалкина – больше 4,0. Для биквадратной функции потерь Тьюки, наоборот, с ростом числа эпох обучения следует уменьшить значение β . Что касается функции потерь Geman–McCluer, то с ростом числа эпох наилучшее значение параметра возрастает достаточно резко – при малом числе эпох (до 300) можно выбирать β на интервале [2,0; 10,0], а с ростом числа эпох можно рассмотреть значения параметра больше 20.

Таблица 3
Рекомендуемые интервалы значений параметра робастных функций потерь

Функция потерь	100 эпох	101–300 эпох	301–500 эпох
Биквадратная Тьюки	[1,5; 1,7]	[1,3; 1,6]	[1,2; 1,5]
Коши	[0,7; 1,3]	[2,4; 3,3]	[3,6; 5,2]
Geman–McCluer	[2,0; 5,0]	[9,5; 10]	≥ 20
Charbonnier	[1,2; 1,7]	[2,2; 2,7]	[2,8; 3,3]
Мешалкина	[1,4; 2,2]	[1,8; 3,3]	[2,2; 3,8]

Второй этап исследований заключался в сравнении построенных ИНС по точности работы. Для этого при каждой доле засоряющих наблюдений фиксировались значения метрики α , полученные при наилучших значениях параметра β . В табл. 4 приводятся результаты для всех рассматриваемых робастных функций потерь, а также результаты для ИНС с функцией потерь Хьюбера (столбец f_6) и для классической ИНС (столбец f_7), полученные авторами ранее в [6].

Таблица 4

Точность классификации при различных значениях доли выбросов

λ	h	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7
0,05	100	76,9	77,0	76,7	77,0	76,9	76,7	75,0
	300	91,3	90,6	91,3	90,6	91,3	90,7	89,2
	500	96,8	94,5	96,7	94,5	96,7	94,3	91,4
0,10	100	72,3	72,1	72,3	72,1	72,3	71,9	71,6
	300	89,8	82,1	89,4	82,5	89,8	83,2	77,8
	500	95,7	91,2	95,5	91,5	95,6	91,3	83,5
0,15	100	71,2	71,4	71,6	71,6	71,1	71,5	69,8
	300	86,6	84,0	86,5	84,8	86,6	84,8	77,8
	500	94,3	89,9	94,3	90,8	94,3	90,6	82,4
0,20	100	68,0	67,7	68,0	67,8	68,1	67,7	67,2
	300	79,8	77,9	79,8	78,7	79,8	78,6	72,6
	500	91,3	87,9	91,3	88,3	91,3	89,1	78,9
0,25	100	70,7	69,5	70,6	69,6	70,1	69,3	67,3
	300	93,1	86,7	93,1	87,4	93,1	87,3	76,6
	500	98,6	94,1	98,6	94,3	98,7	94,0	85,2
0,30	100	69,1	67,7	69,1	67,6	69,1	67,3	66,3
	300	87,7	85,6	87,7	84,7	87,5	85,1	76,4
	500	95,5	92,2	94,6	92,4	95,5	92,2	84,8
0,35	100	69,6	67,9	69,6	67,8	69,5	67,7	65,6
	300	89,5	82,9	89,2	82,6	89,5	84,1	74,7
	500	96,0	90,1	95,9	89,9	96,0	90,8	81,8
0,40	100	69,4	69,0	69,4	69,1	69,4	69,0	67,0
	300	86,9	83,1	86,4	84,1	87,1	84,9	74,3
	500	95,4	89,9	95,2	90,9	95,4	90,7	80,3

Значения метрики α рассматривались на 100, 300 и 500 эпох обучения. С ростом числа эпох точность работы сетей достигала значений 98–100%, что позволяет сделать вывод о потенциально возможном переобучении сетей. Рассматривать такие случаи при сравнении точности работы сетей нецелесообразно, поэтому результаты при большем числе эпох не приводятся.

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод о том, что при малом числе эпох (100) даже при небольших значениях доли засоряющих наблюдений ($\lambda = 0,05$ и $\lambda = 0,10$) робастные ИНС дают выигрыш в точности работы в среднем около 1,5%. С ростом числа эпох и доли засоряющих

наблюдений разница в точности работы классической и робастных ИНС становится все более существенной. Так, при классификации сильно зашумленных данных (доля выбросов $\lambda = 0,35$ и $\lambda = 0,40$) после 500 эпох обучения робастные сети начинают работать точнее в среднем на 11,7%, а в отдельных случаях позволяют получить выигрыш в точности до 15% (нейронная сеть с функцией потерь Charbonnier).

Из табл. 4 видно, что все робастные нейронные сети можно условно разделить на две группы. Первая группа будет включать в себя сети с функциями потерь Коши, Geman–McCluer и Charbonnier, вторая – сети с функциями потерь Мешалкина, Хьюбера и биквадратной функцией потерь Тьюки. Между собой сети из каждой группы при всех значениях λ сопоставимы по точности работы, однако значение метрики α для сетей, входящих во вторую группу, в среднем на 3,5% ниже, чем для сетей из первой группы. Кроме того, для всех построенных сетей можно заметить снижение точности работы при доле засоряющих наблюдений $\lambda = 0,20$, а также резкий рост значения метрики α при доле выбросов $\lambda = 0,25$. Такая разница в точности работы сетей объясняется конфигурацией выборок – тем, насколько далеко друг от друга расположены различные классы объектов. Подробное объяснение этого эффекта приводится в [6].

На третьем этапе исследований изучалось влияние объема набора данных, для которого выполнялась классификация, на точность работы построенных нейронных сетей. Поскольку набор «Ирисы Фишера» является достаточно малым, а использование технологии bootstrap привело бы к внесению дополнительного шума в данные, на этом этапе использовался синтетический набор данных, полученный с использованием генератора данных языка Python 3.6 [15]. Данный инструмент позволяет генерировать облака нормально распределенных данных, используя которые, можно сформировать признаки объектов для классификации.

В рамках данной работы был сгенерирован набор данных, аналогичный по структуре набору «Ирисы Фишера»: все объекты делились на три сбалансированных класса, каждый объект описывался четырьмя признаками. Наиболее различительными признаками являлись признаки 3 и 4, зашумление выборки выполнялось в соответствии с (2), (3). Рассматривались наборы данных, включающие в себя 150, 450, 600 и 900 объектов (столбец $|X|$), при доле выбросов $\lambda = 0,25$. Для робастных функций потерь значения параметра β выбирались согласно данным ранее рекомендациям. Точность работы нейронных сетей, как и на предыдущем этапе, фиксировалась после 100, 300 и 500 эпох обучения. Результаты данного этапа исследований представлены в табл. 5.

Анализируя представленные в табл. 5 значения метрики α , можно сказать, что в целом с ростом числа объектов в наборе данных скорость обучения робастных нейронных сетей падает. Хотя увеличение числа объектов со 150 до 450 зачастую не сказыва-

ется на точности работы нейронных сетей негативным образом, дальнейшее увеличение числа объектов приводит к снижению точности работы нейронных сетей. Так, по сравнению с набором, состоящим из 450 объектов, точность классификации для набора из 600 объектов снизилась примерно на 1%, а для набора из 900 объектов – на 2%. Это объясняется тем, что с ростом объема данных в целом число нетипичных наблюдений также растет.

Таблица 5

Точность классификации при различном объеме набора данных								
$ X $	h	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7
		$\beta=4,5$	$\beta=1,3$	$\beta=20,0$	$\beta=3,3$	$\beta=2,8$	$\beta=0,2$	–
150	100	88,4	83,8	78,3	84,6	97,8	83,0	74,2
	300	99,9	88,8	99,9	89,3	99,9	90,9	85,9
	500	99,9	92,7	100,0	93,4	99,9	95,6	91,0
450	100	86,5	67,0	92,0	67,0	76,1	67,0	67,0
	300	97,6	88,9	97,7	89,5	97,3	92,3	87,6
	500	99,2	95,7	99,3	95,9	99,1	97,4	94,1
600	100	72,5	68,1	78,6	68,0	67,7	67,5	67,5
	300	96,4	91,3	96,4	91,9	96,1	93,9	87,3
	500	98,2	95,5	98,3	95,6	98,0	96,5	93,0
900	100	68,0	69,6	70,0	69,5	67,0	68,5	68,3
	300	96,8	88,5	97,1	88,7	96,1	91,3	88,0
	500	98,3	92,2	98,5	92,6	97,9	94,6	91,2

По сравнению с классической ИНС наименьший выигрыш в точности работы на данном этапе дала биквадратная функция потерь Тьюки (от 1 до 2,5%), а наибольший – функции потерь Коши и Geman–McCluer (от 5,2 до 9%). Однако очевидно, что нейронные сети с функциями потерь Коши и Geman–McCluer обучаются быстрее остальных и уже на 300 эпох достигают очень высоких значений точности классификации. Дальнейшее увеличение числа эпох приведет к переобучению этих сетей.

Заключение

В ходе выполнения работы были построены пять новых робастных нейронных сетей, в которых использовались следующие функции потерь: Коши, биквадратная функция потерь Тьюки, Мешалкина, Geman–McCluer и Charbonnier. Кроме того, рассматривались построенные ранее классическая ИНС и робастная ИНС с функцией потерь Хьюбера. Была исследована устойчивость моделей к наличию выбросов путем ряда вычислительных экспериментов. Результаты, полученные в ходе проведения исследований, позволили сформировать рекомендации относительно выбора значения параметра β для рассмотренных робастных функций потерь. Для каждой функции были определены наилучшие значения, а также рекомендуемые интервалы значений параметра в зависимости от числа эпох обучения нейронной сети. Было показано, что выбор значений параметра за пределами рекомендуемого интервала приводит к ухудшению точности работы сети.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-37-90077.

Литература

1. Ланкин Ю.П. Нейросетевой анализ сложноорганизованных экологических данных / Ю.П. Ланкин, Т.Ф. Басканова, Т.И. Лобова // *Современные проблемы науки и образования*. – 2012. – № 4 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=6754>, свободный (дата обращения: 05.10.2021).
2. Манжула В.Г. Нейронные сети Кохонена и нечеткие нейронные сети в интеллектуальном анализе данных / В.Г. Манжула, Д.С. Федяшов // *Фундаментальные исследования*. – 2011. – № 4. – С. 108–115 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=21239>, свободный (дата обращения: 05.10.2021).
3. Глубокие нейросети. – Ч. I: Подготовка данных [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mql5.com/ru/articles/3486>, свободный (дата обращения: 05.10.2021).
4. Fan J. *Local Polynomial Modelling and Its Applications*. / J. Fan, I. Gijbels. – UK; London: Chapman & Hall, 1996. – 360 p.
5. Huber J.P. *Robust statistics*, 2nd edition. – New Jersey, Hoboken: Wiley, 2009. – 370 p.
6. Сивак М.А. Построение робастных нейронных сетей с различными функциями потерь / М.А. Сивак, В.С. Тимофеев // *Системы анализа и обработки данных*. – 2021. – № 2 (82). – С. 67–83.
7. Демиденко Е.З. *Линейная и нелинейная регрессии*. – М.: Финансы и статистика, 1981. – 304 с.
8. Black M.J. On the unification of line processes, outlier rejection, and robust statistics with applications in early vision. / M.J. Black, A. Rangarajan // *International Journal of Computer Vision*. – 1996. – Vol. 19. – P. 57–91.
9. Fair Loss: Margin-Aware Reinforcement Learning for Deep Face Recognition / B. Liu, W. Deng, Y. Zhong, M. Wang, J. Hu, X. Tao, Y. Huang [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://openaccess.thecvf.com/content_ICCV_2019/papers/Liu_Fair_Loss_Margin-Aware_Reinforcement_Learning_for_Deep_Face_Recognition_ICCV_2019_paper.pdf, свободный (дата обращения: 19.10.2021).
10. Сивак М.А. Исследование применимости робастных функций потерь в нейронных сетях // *Сб. науч. трудов НГТУ*. – 2020. – № 4 (99). – С. 50–58.
11. Bishop C. *Neural Networks for Pattern Recognition*. – US, New York: Oxford University Press, 1995. – 502 p.
12. UCI Machine Learning Repository [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ics.uci.edu/mlearn/MLRepository.html>, свободный (дата обращения: 05.10.2021).
13. Classification: Accuracy [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://developers.google.com/machine-learning/crash-course/classification/accuracy>, свободный (дата обращения: 05.10.2021).
14. Ивахненко А.Г. Помехоустойчивость моделирования / А.Г. Ивахненко, В.С. Степашко. – Киев: Наук. думка, 1985. – 216 с.
15. How to Generate Test Datasets in Python with scikit-learn [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://machinelearningmastery.com/generate-test-datasets-python-scikit-learn/>, свободный (дата обращения: 05.10.2021).

Сивак Мария Алексеевна

Аспирант каф. теоретической и прикладной информатики (ТПИ) Новосибирского государственного технического университета (НГТУ)
К. Маркса пр-т, 20, г. Новосибирск, Россия, 630073
Тел.: +7-951-388-14-89
Эл. почта: pepelyaeva@ami.nstu.ru

Тимофеев Владимир Семенович

Докт. техн. наук, профессор каф. ТПИ НГТУ
К. Маркса пр-т, 20, г. Новосибирск, Россия, 630073
Тел.: +7-913-952-26-46
Эл. почта: v.timofeev@corp.nstu.ru

Sivak M.A., Timofeev V.S.

Adjusting robust neural networks for solving the classification problem

The paper highlights the problem of building and adjusting robust neural networks applying different loss functions for solving the classification problem. The considered functions are those of Cauchy, Meshalkin, Geman-McCluer, Charbonnier and Tukey's Biweight losses. The accuracy of classification is examined for the different values of outliers' fraction, for several values of learning epochs count and for datasets with various sizes. For all obtained networks the parameter values that maximize the accuracy, are defined. The best practices for choosing the parameter values depending on epoch count are also defined for all the loss functions. The ordinary neural network (with quadratic loss) and the robust neural network applying the Huber loss are also considered. The analysis of the results shows that the use of robust approach can significantly increase the learning rate and the classification accuracy, however, choosing the incorrect parameter value can decrease the accuracy of classification.

Keywords: artificial neural network, error back-propagation algorithm, outliers, computational experiment, robust technique, loss function, machine learning, classification problem.
doi: 10.21293/1818-0442-2021-24-3-26-32

References

1. Lankin Yu.P., Baskanova T.F., Lobova T.I. [Neural network analysis of complicated ecological data]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*, 2012, no. 4 (in Russ.) Available at: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=6754>, free (Accessed: October 05, 2021).
2. Manzhula V.G., Fedyashov D.S. [Kohonen neural networks and fuzzy neural networks in data mining]. *Fundamentalnye issledovaniya*, 2011, no. 4, pp. 108–115 (in Russ.) Available at: <https://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=21239>, free (Accessed: October 05, 2021).
3. *Glubokie neuroseti (Chast' 1). Podgotovka dannyh.* [Deep neural networks (Part 1). Data preprocessing.]. Available at: <https://www.mql5.com/ru/articles/3486>, free (Accessed: October 05, 2021).
4. Fan J., Gijbels I. *Local Polynomial Modelling and Its Applications*, Chapman & Hall, UK; London, 1996, 360 p.
5. Huber J.P. *Robust statistics, 2nd edition*, Wiley, Hoboken, New Jersey, 2009, 370 p.

6. Sivak M.A., Timofeev V.S. [Building robust neural networks using different loss functions]. *Analysis and Data Processing Systems*, 2021, no. 2 (82), pp. 67–82 (in Russ.).

7. Demidenko E.Z. *Linejnaja i nelinejnaja regressii* [Linear and non-linear regression]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 1981. 304 p. (in Russ.).

8. Black M.J., Rangarajan A. On the unification of line processes, outlier rejection, and robust statistics with applications in early vision, *International Journal of Computer Vision*, 1996, vol. 19, pp. 57–91.

9. B. Liu, W. Deng, Y. Zhong, M. Wang, J. Hu, X. Tao, Y. Huang. Fair Loss: Margin-Aware Reinforcement Learning for Deep Face Recognition. Available at: https://openaccess.thecvf.com/content_ICCV_2019/papers/Liu_Fair_Loss_Margin-Aware_Reinforcement_Learning_for_Deep_Face_Recognition_ICCV_2019_paper.pdf, free (Accessed: October 19, 2021).

10. Sivak M.A. [The research on using robust loss functions for neural networks]. *Transaction of Scientific Papers of the Novosibirsk State Technical University*, 2020, no. 4 (99), pp. 50–58 (in Russ.).

11. Bishop C. *Neural Networks for Pattern Recognition*. US, New York: Oxford University Press, 1995. 502 p.

12. UCI Machine Learning Repository. Available at: <http://www.ics.uci.edu/ml/MLRepository.html>, free (Accessed: October 05, 2021).

13. Classification: Accuracy. Available at: [\[course/classification/accuracy\]\(#\), free \(Accessed: October 05, 2021\).](https://developers.google.com/machine-learning/crash-</p></div><div data-bbox=)

14. Ivahnenko A.G., Stepashko V.S. *Pomehustojchivost' modelirovaniya* [Noise-resistant modelling]. Kiev, Nauk. Dumka Publ., 1985. 21 p. (in Russ.).

15. How to Generate Test Datasets in Python with scikit-learn. Available at: <https://machinelearningmastery.com/generate-test-datasets-python-scikit-learn/>, free (Accessed: October 05, 2021).

Maria A. Sivak

Postgraduate Student, Department of Theoretical and Applied Computer Science, Novosibirsk State Technical University (NSTU) 20, K. Marksa pr., Novosibirsk, Russia, 630073
Phone: +7-951-388-14-89
Email: pepelyaeva@ami.nstu.ru

Vladimir S. Timofeev

Doctor of Science in Engineering, Professor, Department of Theoretical and Applied Computer Science, NSTU 20, K. Marksa pr., Novosibirsk, Russia, 630073
Phone: +7-913-952-26-46
Email: v.timofeev@corp.nstu.ru

УДК 621.396.41

Я.В. Крюков, Д.А. Покаместов, Е.В. Рогожников, С.А. Новичков, Д.В. Лаконцев

Математическая модель оценки вероятности коллизий преамбул при случайном доступе в сценарии массового межмашинного взаимодействия

Сценарий массового межмашинного взаимодействия mMTC является одним из ключевых в сотовой системе связи пятого поколения 5G New Radio. В одной соте mMTC могут одновременно работать десятки тысяч устройств, которые асинхронно отправляют данные в точку сбора информации. Это является причиной возникновения неизбежных коллизий преамбул при процедуре случайного доступа. Для достоверной оценки вероятности коллизий используются математические модели генерирования трафика от большого количества устройств внутри соты. Большинство существующих моделей основано на подходе генерирования агрегированного трафика от всех устройств и не позволяет учитывать текущее состояние каждого отдельного устройства mMTC, что снижает достоверность модельных исследований. Для решения этой проблемы нами предложена математическая модель генерирования трафика (преамбул) в канале случайного доступа, учитывающая матрицу переходных состояний дискретной цепи Маркова. Такой подход позволяет более достоверно описать синхронную и асинхронную передачу преамбул внутри соты. Разработанная модель предназначена для оценки вероятности коллизий при осуществлении процедуры случайного доступа в сценарии mMTC, учитывающая синхронную и асинхронную передачу преамбул.

Ключевые слова: 5G NR, mMTC, коллизия, случайный доступ, модель трафика.

doi: 10.21293/1818-0442-2021-24-3-33-37

Начиная с 2020 г. в мире началось широкомаштабное развертывание сетей беспроводного широкополосного доступа пятого поколения (5G), которые разработаны консорциумом 3rd Generation Partnership Project (3GPP) и получили название New Radio (NR). Сети предыдущих поколений были ориентированы, в первую очередь, на предоставление услуг голосовой связи и широкополосного доступа в сеть интернет для абонентов. Однако стремительное развитие концепции «интернета вещей» стало причиной необходимости обеспечения беспроводным подключением огромного количества устройств, которые не привязаны к конкретному абоненту (человеку), а являются частью инфраструктуры (промышленной, городской и т.д.). В рамках стандарта 5G NR для таких устройств предусмотрен новый тип сервиса, который называется Massive Machine Type Communication (mMTC) и ориентирован на оптимизацию использования сетевых ресурсов для поддержки большого количества стабильных соединений, приходящихся на единицу площади (высокая плотность сетевых устройств).

Трафик mMTC имеет две ключевые особенности. Он является однородным, потому что множество устройств могут генерировать одинаковый трафик. К тому же трафик mMTC может быть синхронным, потому что множество устройств одновременно реагирует на глобальные события внутри соты (например, опрос сетевых устройств или перезагрузка сети).

Для передачи трафика каждое устройство подключается к RAN (Radio Access Network, сеть радиодоступа) [1]. Для этого используется процедура RA (Random Access, случайный доступ) [2], которая широко используется в существующих сотовых системах связи. Для первичного подключения к узловой

станции (gNB) пользовательское устройство генерирует специальную преамбулу и передает ее по восходящему каналу. Для gNB время прихода, частотный подканал и тип преамбулы являются случайными. После декодирования преамбулы gNB отправляет ответное сообщение с инструкциями для дальнейшего подключения.

Проблема заключается в том, что передача преамбулы не координируется gNB, поэтому несколько пользовательских устройств могут одновременно начать ее отправку. В этом случае на стороне gNB возникает коллизия, которая успешно разрешается при малом количестве устройств. Однако при большом количестве устройств вероятность возникновения коллизии повышается, а вероятность ее разрешения существенно снижается. Кроме того, синхронная инициация процедуры RA также приведет к росту вероятности коллизий. Поэтому актуальной задачей является разработка математических моделей для генерирования трафика RA в сценарии mMTC с большим количеством устройств, чтобы получить достоверную оценку вероятности коллизий.

Чаще всего для моделирования трафика используется два подхода: генерирование трафика от отдельного источника или генерирование агрегированного потока трафика от всех источников [3]. Большинство существующих моделей основано на втором подходе, потому что временное распределение входящего трафика легко описывается распределением Пуассона. Базовая модель 3GPP для моделирования трафика, основанная на втором подходе, представлена в [4].

Однако такие модели не позволяют учитывать поведение каждого отдельного устройства mMTC, поэтому существуют более сложные модели генери-

рования трафика, которые основаны на первом подходе. Они позволяют генерировать трафик каждого конкретного сетевого устройства, учитывая его текущее состояние и модель поведения. Существенной проблемой таких моделей является стремительный рост вычислительной сложности при увеличении количества устройств.

Решая эту проблему, в работах [5, 6] предложен подход моделирования трафика с помощью цепей Маркова. Такая модель позволяет генерировать синхронный и асинхронный трафик, а также учитывать набор конечных состояний устройств и вероятности перехода между состояниями.

В своей работе мы предлагаем собственную математическую модель для оценки вероятности коллизий в сценарии mMTC, используя модель генерирования трафика [5].

Модель 3GPP для генерирования трафика

Модель 3GPP является одной из самых часто используемых математических моделей для генерирования mMTC трафика. Она позволяет рассчитать временное распределение среднего количества принимаемых пакетов в заданном временном интервале. Поскольку в нашей работе рассматривается процедура случайного доступа, то под передачей пакета подразумевается передача преамбулы. Модель 3GPP включает в себя два сценария для генерирования асинхронного и синхронного трафика соответственно. Сценарии отличаются друг от друга законом распределения вероятности прибытия преамбул $f(t)$ на временном интервале $[0, T]$ с периодом дискретизации Δt . В дискретной модели $t = k\Delta t$, где $k = 1, 2, \dots, K$ – номер дискретного отсчета, а K – общее количество дискретных отсчетов на временном интервале $[0, T]$. Поскольку преамбула размещается внутри единого радиокадра длительностью 10 мс [7], то дискретом модели выбрана длительность одного радиокадра в 5G NR, поэтому $\Delta t = 10$ мс. В этом случае k будет означать порядковый номер принимаемого радиокадра.

Характеристики моделей и их различия приведены в таблице [4].

Характеристики моделей 3GPP

Характеристика	Модель 1 ($m = 1$)		Модель 2 ($m = 2$)	
	1000	3000	5000	10000 30000
Тип трафика	Несинхронный		Синхронный	
Закон $f(t)$	Равномерное		Beta (3,4)	
Период, T	60 с		10 с	

Предполагается, что каждое из N устройств совершит одну передачу за временной период T , поэтому суть моделирования сводится к распределению N принимаемых преамбул во времени. Функция равномерного распределения для модели 1 рассчитывается согласно

$$f_1(k) = 1/K. \tag{1}$$

Распределение $f_2(k)$ для модели 2 может быть представлено [4] в виде

$$f_2(k) = \frac{(\Delta t \cdot k)^{\alpha-1} \cdot (T - \Delta t \cdot k)^{\beta-1}}{T^{\alpha+\beta-1} \cdot \text{Beta}\{\alpha, \beta\}}, \tag{2}$$

где $\text{Beta}\{\cdot\}$ – бета-функция с параметрами $\alpha = 3, \beta = 4$.

Обозначим среднее количество принимаемых преамбул в k -й временной отсчет величиной $\lambda(k)$. Тогда $\lambda(k)$ для N устройств может быть вычислена с помощью выражения

$$\lambda_m(k) = N \cdot f_m(k). \tag{3}$$

На рис. 1 приведены $\lambda_1(k\Delta t)$ и $\lambda_2(k\Delta t)$ для $T = 10$ с, $N = 30000$ и $\Delta t = 10$ мкс.

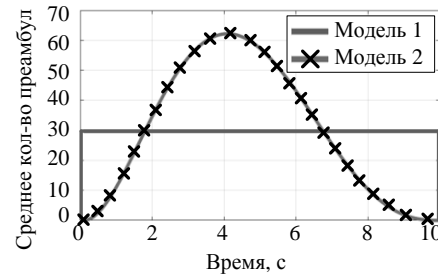


Рис. 1. Среднее количество принимаемых преамбул

Модель СММРР для генерирования трафика

Модель СММРР (Coupled Markov Modulated Poisson Processes) [5, 6] разработана для генерирования синхронного и асинхронного трафиков в сети с большим количеством устройств mMTC. Она позволяет преодолеть основные ограничения базовой модели 3GPP и учитывать состояние каждого конкретного устройства. Для этого предлагается совместное использование Марковских и Пуассоновских процессов.

Каждое n -е устройство описывается набором состояний s_n Марковской цепи и квадратной матрицей вероятностей смены состояний P_n , а каждому состоянию соответствует определенный объем и тип передаваемого трафика. Примером может служить упрощенная модель устройства с двумя состояниями: 1) регулярная передача полезного трафика, 2) редкая передача служебного трафика.

Матрица P_n выглядит следующим образом:

$$P_n = \begin{pmatrix} p_{1,1}^{(n)} & p_{1,2}^{(n)} & \dots \\ p_{2,1}^{(n)} & p_{2,2}^{(n)} & \\ \vdots & & \ddots \end{pmatrix},$$

где $p_{a,b}^{(n)}$ – вероятность перехода из состояния b в состояние a устройства n . Общее число состояний обозначается символом I , а вероятность каждого состояния описывается вектором π_n :

$$\pi_n = \begin{pmatrix} \pi_{1,n} \\ \pi_{2,n} \\ \vdots \end{pmatrix}.$$

Величины P_n и π_n связаны балансным уравнением [5, 6]

$$\pi_n = P_n \pi_n, \quad (4)$$

где π_n – это собственный вектор матрицы P_n при собственном числе матрицы P_n , равном единице.

Для всех устройств mMTC авторы определяют матрицы P_C и P_U , которые соответствуют синхронному и асинхронному режимом передачи соответственно. Обе матрицы являются входной переменной и инициализируются при моделировании. Общий для всех устройств процесс перехода к синхронному состоянию описывается величиной $\theta(k) \in [0,1]$, где $\theta(k) = 0$ означает асинхронную и $\theta(k) = 1$ – синхронную передачу. Вводится параметр $\delta_n \in [0,1]$, который назначается каждому n -му устройству и интерпретируется как близость устройства к эпицентру синхронной передачи.

Далее вычисляется выражение для определения вероятности нахождения каждого n -го устройства в состоянии синхронной передачи

$$\theta_n(k) = \delta_n \theta(k). \quad (5)$$

Используя P_C и P_U , вычисляется матрица смены состояний $P_n(k)$ каждого n -го устройства в момент времени k по формуле

$$P_n(k) = \theta_n(k)P_C + (1 - \theta_n(k))P_U. \quad (6)$$

Используя матрицу $P_n(k)$, можно в каждый временной отсчет определять вероятность нахождения n -го устройства в одном из I состояний.

Расчет вероятности коллизий преамбул PRACH

Как говорилось ранее, для инициализации случайного доступа устройство посылает одну из преамбул в определенном частотно-временном сегменте радиокадра. Количество доступных для передачи преамбул зависит от конфигурации канала PRACH (Physical Random Access Channel) [8], а сама преамбула выбирается случайно из общего пула размерностью L . Например, для 6-й конфигурации PRACH определено $L = 54$ преамбулы.

Считается, что коллизия произошла в том случае, если в одном и том же радиокадре передаются как минимум 2 одинаковые преамбулы. В случае коллизии преамбулы могут быть успешно детектированы, а вероятность успешного детектирования зависит от энергетических параметров принятого сигнала и интерференционной помехи. В рамках нашей работы вероятность успешного детектирования не рассматривается.

Согласно приложению Б технической рекомендации [8], вероятность коллизии $\rho_c(k)$ преамбулы в k -м радиокадре может быть получена по формуле

$$\rho_c(k) = 1 - e^{-\frac{\lambda(k)}{L}}. \quad (7)$$

На рис. 2 приведены зависимости $\rho_c(k\Delta t)$, полученные с помощью (7) для $\lambda_1(k\Delta t)$ и $\lambda_2(k\Delta t)$ из модели 3GPP с используемой ранее конфигурацией (см. рис. 1) и $L = 54$.

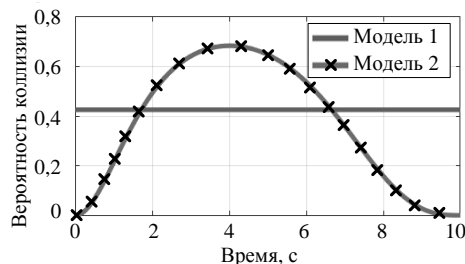


Рис. 2. Вероятность коллизии

Предлагаемая модель оценки вероятности коллизий

Предлагаемая нами математическая модель позволяет получить оценку вероятности коллизий преамбул ρ_c во временном интервале $[0, T]$ для N устройств mMTC в сети, учитывая синхронный и асинхронный режимы передачи. Предполагается, что устройства могут находиться в двух состояниях: 1) не требуется передача преамбулы (сон, регулярная передача данных и т.д.); 2) требуется передача преамбулы.

Асинхронный режим отражает обычное рабочее состояние сети, в котором все устройства передают данные независимо друг от друга. Синхронный режим отражает стрессовое состояние сети, которое может быть вызвано, например, её перезагрузкой и потерей соединения между устройствами и gNB. В этом случае часть устройств одновременно переходит в состояние 2 и начинает процедуру случайного доступа для повторного подключения. Для синхронного режима свойственны взрывное увеличение количества принимаемых преамбул и рост ρ_c .

Наш подход заключается в расчете вероятности коллизий преамбул ρ_c с помощью выражения (7) из технической рекомендации [8], заранее вычислив количество устройств в состоянии передачи преамбул с помощью модели CMMPP, используя распределения f_1, f_2 из модели 3GPP в качестве функции перехода между асинхронным и синхронным режимами передачи.

Процедура моделирования включает в себя следующие этапы:

1. Процесс перехода к синхронному состоянию инициализируется распределением f_1 или f_2 , поэтому $\theta(k) = f_1(k)$ (1) или $\theta(k) = f_2(k)$ (2).

2. Инициализируется вектор значений δ , учитывая $\delta \in [0,1]$.

3. Объявляются общие для всех устройств матрицы смены состояний размерностью 2×2 в синхронном P_C и асинхронном P_U режимах.

4. Рассчитывается вектор вероятности состояний $\pi_n(k)$ из (4), предварительно рассчитав (5) и (6). Обозначим вероятность нахождения n -го устройства в состоянии передачи преамбулы в k -й временной отсчет с помощью переменной $w_n(k)$. Предполагается, что процедура случайного доступа выполняется один раз, поэтому устройство может единожды находиться в этом состоянии. Если сумма вероятностей

w_n на временном интервале $1, 2, \dots, k$ превышает 1, то на оставшемся интервале $k+1, \dots, K$ устройство n принудительно переводится в состояние 1. Поэтому

$$\begin{cases} w_n(k) = \pi_{2,n}(k), \text{ если } \sum_{m=1}^k \pi_{2,n}(m) < 1; \\ w_n(k) = 0, \text{ иначе.} \end{cases}$$

5. Рассчитывается среднее количество принимаемых преамбул $\lambda(k)$ с помощью формулы

$$\lambda(k) = \sum_{n=1}^N w_n(k). \quad (8)$$

6. Рассчитывается вероятность коллизий $\rho_c(k)$ с помощью (7), используя результат (8).

Результат моделирования

Для демонстрации работы модели на рис. 3 приведен результат моделирования для следующей конфигурации: $N = 5000$, $T = 10$ с, $\Delta t = 10$ мкс, $L = 54$, $\theta \sim f_2$, распределение δ подчиняется равномерному закону распределения от 0 до 1, т.е. $\delta \sim U[0,1]$. Используются матрицы вероятностей смены состояний:

$$\mathbf{P}_C = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{P}_U = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

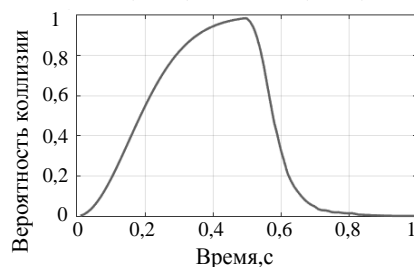


Рис. 3. Вероятность коллизий, полученная с помощью предлагаемой модели

На рис. 3 временная ось ограничена 1 с, потому что за это время все устройства успевают передать преамбулу. Высокая вероятность коллизий в начале временного интервала связана с тем, что большое количество устройств быстро переходит в синхронный (практически одновременный) режим отправки преамбул. После передачи преамбулы устройства переходят в состояние 1 и количество принимаемых преамбул существенно уменьшается, что снижает вероятность коллизий на оставшемся временном интервале. Такое поведение связано с выбранными вероятностными характеристиками моделирования, которые являются причиной быстрого перехода системы в синхронный режим.

Предлагаемая модель генерирования трафика в канале случайного доступа основана на модели СММРР, поэтому обладает эквивалентной вычислительной сложностью, сравнительный анализ которой приведен в [5]. По сравнению с моделью 3GPP, разработанная модель позволяет симуляцию потока преамбул для более широкого диапазона сценариев, учитывая синхронную и асинхронную передачу, а также различные состояния устройств.

Заключение

В одной соте 5G NR могут одновременно обслуживаться десятки тысяч устройств mMTC, поэтому особое внимание уделяется проблеме коллизий при

выполнении процедуры случайного доступа. Адекватность оценки коллизий напрямую зависит от используемой модели генерирования и отправки преамбул случайного доступа. Модели, рекомендованные 3GPP, основаны на подходе генерирования агрегированного потока преамбул от всех источников. Однако, для более точного описания трафика необходимы модели, в которых каждый источник представлен в виде отдельного объекта с возможным набором состояний.

В работе предложена математическая модель для симуляции трафика в канале случайного доступа, основанная на подходе СММРР вычислительной сложности и, в отличие от 3GPP, позволяет симуляцию потока преамбул для более широкого диапазона сценариев, учитывая синхронную и асинхронную передачу, а также различные состояния устройств.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минцифры России и АО «РВК», а также Сколковского института науки и технологий, идентификатор соглашения предоставления субсидии 0000000007119P190002, № 005/20 от 26.03.2020 г.

Литература

1. Comprehensive Survey of RAN Architectures Toward 5G Mobile Communication System / M.A. Habibi, M. Nasimi, B. Han, H.D. Schotten // IEEE Access. – 2019. – Vol. 7. – P. 70371–70421.
2. De Andrade T.P. The random access procedure in long term evolution networks for the Internet of Things // IEEE Communications Magazine. – 2017. – Vol. 55, No. 3. – P. 124–131.
3. Cheng R.G. RACH collision probability for machine-type communications // IEEE 75th Vehicular Technology Conference. – 2012. – P. 1–5.
4. 3GPP TR 37.868, 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Study on RAN Improvements for Machine-type Communications; (Release 10) v. 0.6.1 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://itctec.com/archive/3gpp-specification-tr-37-868>, свободный (дата обращения: 28.09.2021).
5. Traffic models for machine type communications / M. Laner, P. Svoboda, N. Nikaein, M. Rupp // The Tenth International Symposium on Wireless Communication Systems. – 2013. – P. 1–5.
6. Traffic models for machine-to-machine (M2M) communications: types and applications / M. Laner, P. Svoboda, N. Nikaein, M. Rupp // Machine-to-machine (M2M) Communications. – 2015. – P. 133–154.
7. 3GPP TS 38.300, 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; NR; NR and NG-RAN Overall Description; Stage 2 (Release 16) v.16.3.0 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138300_138399/138300/15.08.00_60/ts_138300v150800p.pdf, свободный (дата обращения: 28.09.2021).
8. 3GPP R1-061369, LTE random-access capacity and collision probability [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.3gpp.org/ftp/tsg_ran/WG1_RL1/TSGR_1_45/Docs/R1-061369.zip, свободный (дата обращения: 28.09.2021).

Крюков Яков Владимирович

Канд. техн. наук, доцент каф. телекоммуникаций и основ радиотехники (ТОР) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 41-33-98
Эл. почта: kryukov.tusur@gmail.com

Покаместов Дмитрий Алексеевич

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

Рогожников Евгений Васильевич

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

Новичков Серафим Алексеевич

Гл. конструктор лидирующего исследовательского центра
«Сеть радиодоступа 5G с открытой архитектурой», Сколтех
Большой бульвар 30, стр. 1, г. Москва, Россия, 121205
Тел: +7 (495-2) 80-14-81
Эл. почта: S.Novichkov@skoltech.ru

Лаконцев Дмитрий Владимирович

Канд. техн. наук, доцент, руководитель центра
компетенций национальной технической инициативы
«Технологии беспроводной связи и интернета вещей», Сколтех
Большой бульвар 30, стр. 1, г. Москва, Россия, 121205
Тел: +7 (495-2) 80-14-81
Эл. почта: d.lakontsev@skoltech.ru

Kryukov Ya.V., Pokamestov D.A.,

Rogozhnikov E.V., Novichkov S.A., Lakontsev D.V.

Math model for estimating the probability of preambles collisions within random access in the mMTC scenario

The mass machine-to-machine communication (mMTC) scenario is one of the key ones in 5G cellular communication system. Tens of thousands of devices can operate simultaneously in one mMTC cell, sending data asynchronously to the data collection point. This is the reason for the occurrence of unavoidable collisions of preamble in the random access procedure. Mathematical models of traffic generation from a large number of devices within a cell are used to reliably estimate the probability of collisions. Most existing models are based on the approach of generating aggregated traffic from all devices and do not allow taking into account the current state of each individual device, which reduces the reliability of model studies. To solve this problem, we propose a mathematical model for generating traffic (preambles) in a random access channel, taking into account the transition state matrix of a discrete Markov chain. This approach allows to describe more reliably the synchronous and asynchronous transmission of preambles within a cell. The developed model is designed to estimate the collision probability of the random access procedure in the mMTC scenario, taking into account the synchronous and asynchronous transmission of preambles.

Keywords: 5G NR, mMTC, collision, random access, traffic model.

doi: 10.21293/1818-0442-2021-24-3-33-37

References

1. Comprehensive Survey of RAN Architectures Toward 5G Mobile Communication System / M.A. Habibi, M. Nasimi, B. Han, H.D. Schotten // IEEE Access, 2019, vol. 7, pp. 70371–70421.

2. De Andrade T.P. The random access procedure in long term evolution networks for the Internet of Things // IEEE Communications Magazine, 2017, vol. 55, no. 3, pp. 124–131.

3. Cheng R.G. RACH collision probability for machine-type communications // IEEE 75th Vehicular Technology Conference, 2012, pp. 1–5.

4. 3GPP TR 37.868, 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Study on RAN Improvements for Machine-type Communications; (Release 10) v. 0.6.1 Available at: <https://itectec.com/archive/3gpp-specification-tr-37-868> (Accessed: September 28, 2021).

5. Traffic models for machine type communications / M. Laner, P. Svoboda, N. Nikaein, M. Rupp // The Tenth International Symposium on Wireless Communication Systems, 2013, pp. 1–5.

6. Traffic models for machine-to-machine (M2M) communications: types and applications / M. Laner, P. Svoboda, N. Nikaein, M. Rupp // Machine-to-machine (M2M) Communications, 2015, pp. 133–154.

7. 3GPP TS 38.300, 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; NR; NR and NG-RAN Overall Description; Stage 2 (Release 16) v.16.3.0 Available at: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138300_138399/138300/15.08.00_60/ts_138300v150800p.pdf (Accessed: September 28, 2021).

8. 3GPP R1-061369, LTE random-access capacity and collision probability Available at: https://www.3gpp.org/ftp/tsg_ran/WG1_RL1/TSGR1_45/Docs/R1-061369.zip (Accessed: September 28, 2021).

Yakov V. Kryukov

Candidate of Engineering, Assistant Professor,
Department of Telecommunications and Basic Principles of Radio Engineering, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 41-33-98
Email: kryukov.tusur@gmail.com

Dmitriy A. Pokamestov

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

Eugeniy V. Rogozhnikov

Candidate of Engineering, Head of 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: udzhon@mail.ru

Serafim A. Novichkov

Chief Design Engineer of Leading Research Center «5G Open Radio Access Networks», Skoltech
30, bld. 1, Bolshoy Boulevard, Moscow, Russia, 121205
Phone: +7 (495-2) 80-14-81
Email: S.Novichkov@skoltech.ru

Dmitriy V. Lakontsev

PhD, Assistant Professor, Head of the Center of Excellence NTI «The Wireless Network Technologies and Internet of Things», Skoltech
30, bld. 1, Bolshoy Boulevard, Moscow, Russia, 121205
Phone: +7 (495-2) 80-14-81
Email: d.lakontsev@skoltech.ru

УДК 621.396.41

Д.С. Кокин, О.Г. Пономарев

Оценка соотношения между длиной коррелятора и числом абонентов в системе связи с цифровой псевдослучайной модуляцией

Исследуется один из вариантов реализации системы связи с псевдослучайной цифровой модуляцией. У таких систем важным параметром является коэффициент расширения спектра – база сигнала, чем шире база, тем выше помехоустойчивость модулированного сигнала. Данная работа содержит результаты исследования работоспособности, предложенной авторами, системы в условиях многоабонентного использования радиоканала. Численным методом установлена зависимость величины коэффициента расширения – длины коррелятора – от количества абонентов, одновременно работающих в общей полосе частот. Показано, что эта зависимость носит квадратичный характер.

Ключевые слова: цифровая модуляция, сигналы с расширенным спектром, корреляционный прием.

doi: 10.21293/1818-0442-2021-24-3-38-43

В данной работе рассматривается один из вариантов реализации системы связи с псевдослучайной цифровой модуляцией [1–4]. Идея расширения спектра, лежащая в основе рассматриваемой системы связи, во многом схожа с той, что используется в системах с прямым расширением спектра (DSSS) [5–9]. Однако если в DSSS системах для расширения спектра используется псевдослучайный меандровый сигнал, то в данной системе с этой целью используются цифровые отсчеты белого шума, генерируемые по алгоритму Мерсена [10]. Таким образом, в качестве расширяющей последовательности используются случайные нормально распределенные δ -коррелированные дискретные отсчеты с нулевым средним и дисперсией σ^2 . В передающем тракте последовательность этих отсчетов умножается на модуляционные символы (QPSK) информационного сигнала. Для детектирования передаваемого сообщения в приемном тракте используется корреляционная обработка. Возможность корреляционного приема обеспечивается оригинальной системой фазовой и временной синхронизации [11–13].

Период повторения псевдослучайной последовательности, генерируемой по алгоритму Мерсенна, составляет $2^{19937} - 1$ отсчетов. Это предоставляет практически неограниченные возможности по разделению абонентов, использующих не синхронизированные по времени генераторы псевдослучайных чисел (некоторый аналог кодового разделения абонентов). С другой стороны, конечная длина сворачиваемых в корреляционном приемнике цифровых последовательностей, другими словами, конечное число шумоподобных отсчетов, приходящихся на один модуляционный символ информационного сообщения, ограничивает отношение сигнал/шум на выходе коррелятора в приемном тракте и как следствие ограничивает число разделяемых абонентов.

Цель данной работы заключается в том, чтобы определить длину коррелятора, достаточную для детектирования информационного сообщения при

одновременной работе в одном и том же радиоканале заданного количества абонентов.

Ниже кратко описаны процедуры генерации и детектирования сигнала с псевдослучайной цифровой модуляцией, приведено описание численного эксперимента по разделению абонентов в рассматриваемой системе связи.

Функциональная схема передающей части системы

На рис. 1 представлена функциональная схема передающей части системы связи с цифровой псевдослучайной модуляцией. Обозначим за t_s и t_n характерные временные интервалы, определяющие скорость изменения состояния системы связи. Интервал времени t_s задает скорость изменения информационных и синхронизирующих бит. Интервал времени t_n определяет скорость изменения псевдослучайных значений на выходах генераторов, блоки 2, 3 и 4. Интервал времени t_s кратен интервалу времени t_n и на несколько порядков превосходит его. Отношение $T = t_s / t_n$, всегда целое число, задает коэффициент спектрального расширения информационного и синхронизирующего сообщений. С увеличением величины T , с одной стороны, повышается помехоустойчивость модулированного сигнала, с другой стороны, уменьшается скорость передачи сообщений. Частота несущего колебания $f_0 = \omega_0 / 2\pi$ выбирается заведомо выше частоты дискретизации t_n .

Информационный битовый поток (см. рис. 1) поступает на вход QPSK модулятора (блок 2). Результатом работы QPSK модулятора являются модулирующие символы $I(t, t_s)$ и $Q(t, t_s)$. Символы $I(t, t_s)$ перемножаются с псевдослучайными отсчетами $\xi(t, t_n)$, генерируемыми в блоке 1. В результате получается модулированный сигнал $I(t, t_s)\xi(t, t_n)$. Символы $Q(t, t_s)$ перемножаются с псевдослучайными

ми отсчетами $\eta(t, t_n)$, генерируемыми в блоке 3. В результате получается модулированный сигнал $Q(t, t_s)\eta(t, t_n)$. Сигналы $I(t, t_s)\xi(t, t_n)$ и $Q(t, t_s)\eta(t, t_n)$ отвечают за передачу бит информационного сообщения.

В нижней части рис. 1 пунктирной линией выделены блоки, отвечающие за генерацию синхронизирующего сигнала. Биты синхронизирующего сообщения поступают на вход BPSK-модулятора (блок 4), где отображаются в одну из точек BPSK созвездия. Результатом работы BPSK модулятора являются модулирующие символы $S(t, t_s)$. Символы $S(t, t_s)$ перемножаются с псевдослучайными отсчетами, гене-

рируемыми в блоке 5. Полученный сигнал $S(t, t_s)\zeta(t, t_n)$ суммируется с сигналом $I(t, t_s)\xi(t, t_n)$.

Суммарный сигнал переносится в область высоких частот путем умножения на синфазную компоненту несущего высокочастотного колебания с частотой ω_0 . Псевдослучайные отсчеты $\zeta(t, t_n)$, задержанные на N временных интервалов t_n , суммируются с сигналом $Q(t, t_s)\eta(t, t_n)$. Суммарный сигнал переносится в область высоких частот путем умножения на квадратурную компоненту несущего высокочастотного колебания с частотой ω_0 .

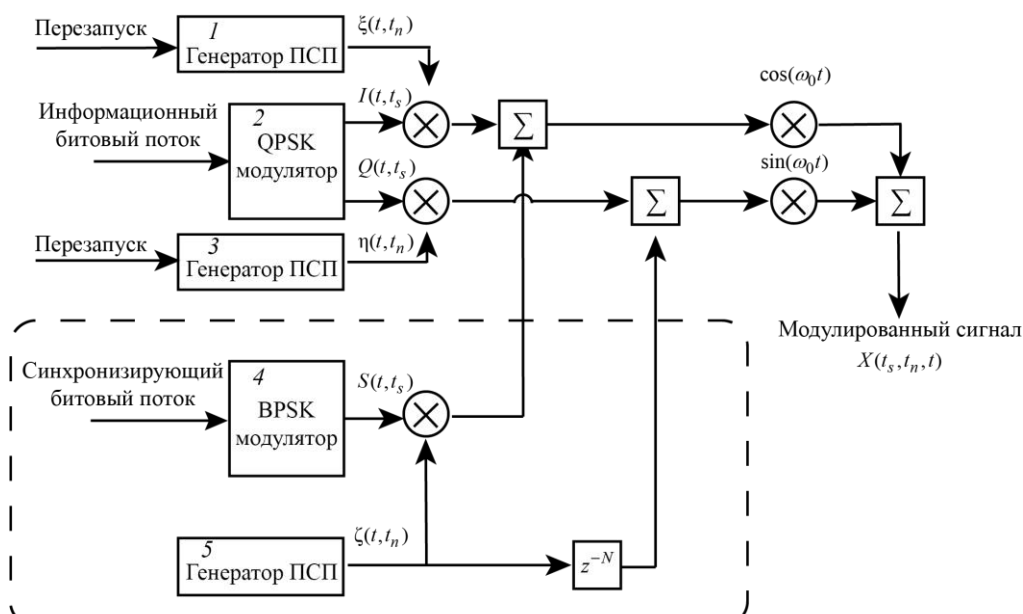


Рис. 1. Функциональная схема передающей части системы связи с псевдослучайной цифровой модуляцией

Передача синхронизирующего сообщения повторяется циклически. В начале каждого цикла производится перезапуск генераторов псевдослучайных последовательностей $\xi(t, t_n)$ и $\eta(t, t_n)$, использующихся для передачи информационного сообщения, блоки 1 и 3 соответственно.

В общем случае модулированный высокочастотный сигнал на выходе передающей части системы имеет следующий вид:

$$X(t, t_s, t_n) = \cos(\omega_0 t)(I(t, t_s)\xi(t, t_n) + S(t, t_s)\zeta(t, t_n)) + \sin(\omega_0 t)(Q(t, t_s)\eta(t, t_n) + S(t - Nt_n, t_n)\zeta(t, t_n)).$$

Функциональная схема приемной части системы

Для детектирования информационных и синхронизирующих бит в приемном устройстве используется корреляционный прием. На рис. 2 представлена упрощенная функциональная схема приемной части системы связи с цифровой псевдослучайной модуляцией. Принимаемый сигнал умножением на синфазную и квадратурную составляющую несущего колебания с частотой ω_0 и фильтрацией фильтрами нижних частот переносится на нулевую частоту. Синфазная компонента фильтрованного сиг-

нала задерживается на N временных интервалов t_n и поступает вместе с квадратурной составляющей на вход коррелятора (блок 3). Знак сигнала на выходе коррелятора определяется значениями бит синхронизирующего сообщения.

В блоке 4 осуществляется детектирование всех бит синхронизирующего сообщения, после чего происходит перезапуск генератора псевдослучайной последовательности (блок 6).

В блоке 5 из синфазной и квадратурной компонент фильтрованного сигнала формируется комплексный сигнал, который вместе с комплексными псевдослучайными отсчетами, генерируемыми в блоке 6, поступает на вход коррелятора, блок 7. Знаки у вещественной и мнимой частей символов на выходе блока 7 определяются битами информационного сообщения. В блоке 8 происходит преобразование символов QPSK созвездия в информационные биты. Для детектирования сигнала с цифровой псевдослучайной модуляцией приемное устройство должно обладать информацией о начальном состоянии генератора расширяющей последовательности (блок 6), величине задержки N и величинах временных интервалов t_s, t_n .

Численное моделирование системы связи при одновременной работе нескольких абонентов

На функциональной схеме передающей части системы связи с цифровой псевдослучайной модуляцией (см. рис. 1), показано, что результирующий сигнал является совокупностью по меньшей мере 2 отличных друг от друга шумоподобных сигна-

лов. Если считать, что при формировании сигнала одного абонента в канале связи используется система, представленная на рис. 1, то при одновременной работе в общей полосе частот A абонентов, на входе приемного устройства регистрируется сигнал, являющийся суммой минимум $2A$ некоррелированных между собой шумоподобных сигналов.

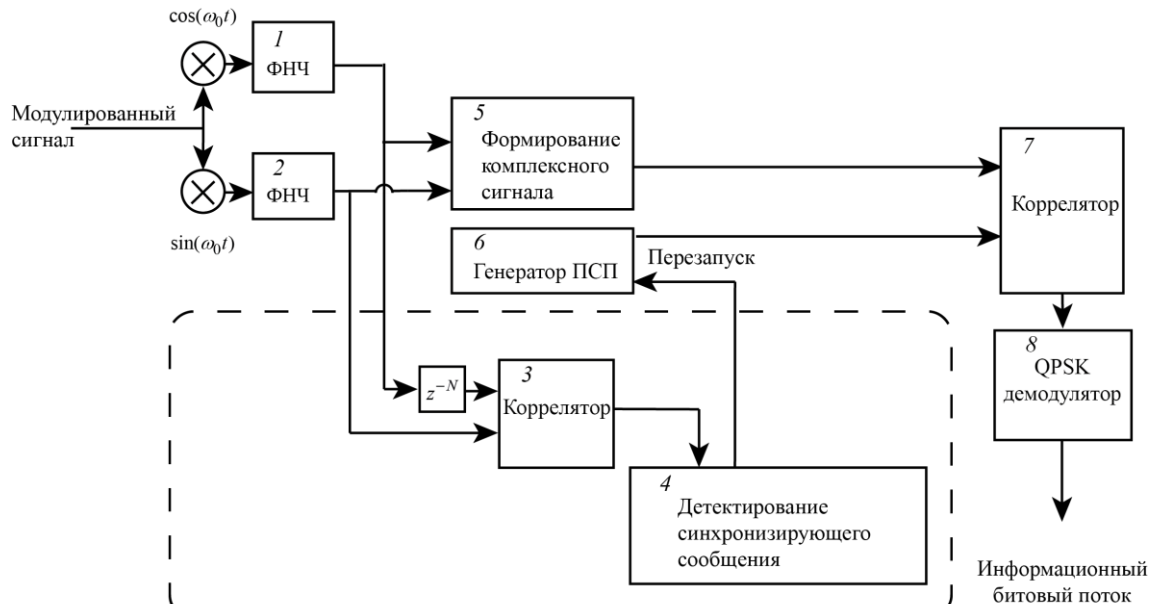


Рис. 2. Функциональная схема приемной части системы связи с псевдослучайной цифровой модуляцией

Оценка количества разделяемых за счет некоррелированности шумоподобных сигналов абонентов системы связи проводилась численным экспериментом. Коррелятором производилось выделение сигнала того или иного абонента. Отношение сигнал/шум на выходах блоков определялось длиной T сворачиваемых в корреляторах цифровых последовательностей. Критерием успешного детектирования сигнала считалось значение отношения сигнал/шум на выходе коррелятора в приемном устройстве выше 3 дБ.

Уровень сигнала определялся квадратом амплитуды центрального пика на выходе коррелятора (рис. 3). Уровень шума рассчитывался как среднее арифметическое между квадратами амплитуд остальных значений.

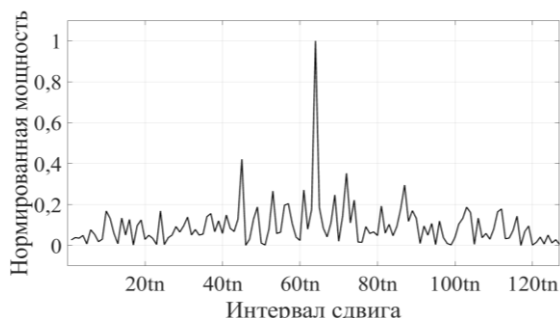


Рис. 3. График мощности на выходе коррелятора. Длина коррелятора $T = 64$, количество псевдослучайных последовательностей при формировании входных значений равно 2

При оценке считалось, что приемный сигнал синхронизирован по времени и фазе. Воздействие посторонних шумов, кроме шумов формирующих сигналов, отсутствовало. Расчет проводился для одного информационного символа.

Численный эксперимент проводился в среде для научных расчетов MatLab. На рис. 4 представлена схема алгоритма, используемого для анализа зависимости длины коррелятора от количества псевдослучайных последовательностей, участвующих в формировании результирующего сигнала на входе приемного устройства.

Количество псевдослучайных последовательностей изменялось от $nS_{\text{Min}} = 2$ до $nS_{\text{Max}} = 27$ (см. рис. 4). Начальное значение длины коррелятора $T = 4$. При расчете использовалась выборка из 100 значений. Считалось, что длины коррелятора T достаточно для текущего количества формирующих псевдослучайных последовательностей, если более 90% значений выборки имели отношение сигнал/шум выше 3 дБ. В противном случае значение T увеличивалось на 1. Алгоритм повторялся 5 раз.

На рис. 5 представлена полученная зависимость длины коррелятора T от количества псевдослучайных последовательностей M , участвующих в формировании результирующего сигнала. Точками отмечены значения, полученные в ходе численного моделирования, сплошной линией отмечена кривая $T = 4M^2$.

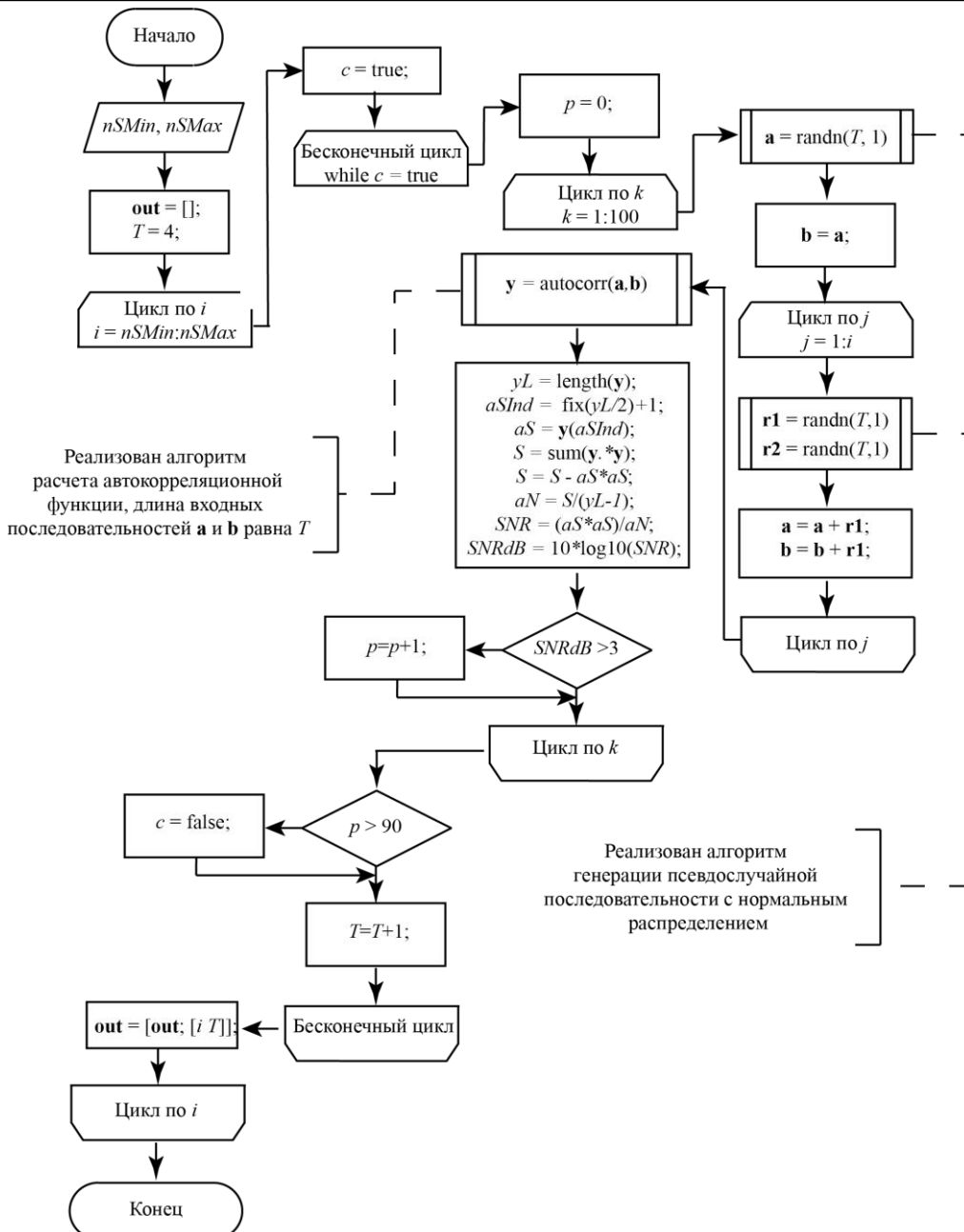


Рис. 4. Схема алгоритма для расчета зависимости длины коррелятора от количества псевдослучайных последовательностей, участвующих в формировании результирующего сигнала

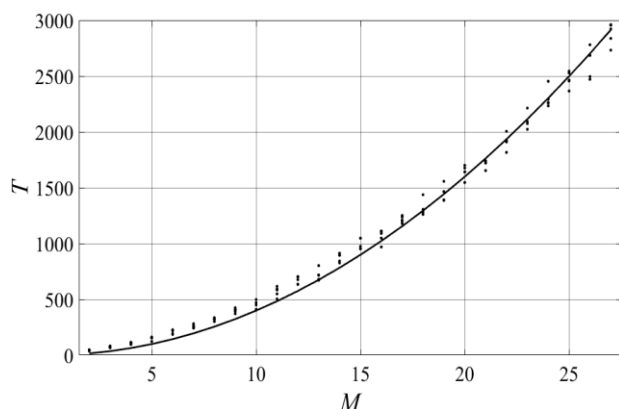


Рис. 5. Зависимость длины коррелятора T от количества псевдослучайных последовательностей M

В системе связи 5G NR максимальная размерность дискретного преобразования Фурье равна 4096 [14–16]. Таким образом, при вычислении операции свертки алгоритмом дискретного преобразования Фурье размерности 4096 рассматриваемая система связи теоретически может обеспечить связь 16 одновременно работающих абонентов.

Выводы

Результаты численного моделирования показали, что значение отношения сигнал/шум на выходе коррелятора выше 3 дБ достигается в том случае, когда длина коррелятора T соотносится с количеством псевдослучайных последовательностей M как $T = 4M^2$. Если считать, что при формировании сигнала одного абонента используются 2 псевдослу-

чайные последовательности, то длина коррелятора T зависит от количества абонентов A как $T = 16A^2$.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по Соглашению с Минобрнауки России от 26 ноября 2019 г. № 075-11-2019-031 (проект «Разработка программно-аппаратного комплекса для формирования тестовых сигналов стандарта 5G NR»).

Литература

1. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. – М.: Радио и связь, 1985. – 384 с.
2. Прокис Дж. Цифровая связь / Дж. Прокис. – М.: Радио и связь, 2000. – 800 с.
3. Сверхширокополосная беспроводная связь на основе динамического хаоса / А.С. Дмитриев, А.В. Клецов, А.М. Лактюшкин и др. // Радиотехника и электроника. – 2006. – № 10. – С. 1126–1140.
4. Калинин В.И. Численное моделирование шумовой системы передачи информации с расширением спектра / В.И. Калинин, Д.Е. Радченко, В.А. Черепенин // Журнал радиоэлектроники. – 2014. – № 10. – С. 1–18.
5. Torrieri D. Principles of Spread-Spectrum Communication Systems [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.studmed.ru/torrieri-d-principles-of-spread-spectrum-communication-systems_a64dd824ecf.html, свободный (дата обращения: 25.09.2021).
6. Polydoros A. Detection Performance Considerations for Direct-Sequence and Time-Hopping LPI Waveforms / A. Polydoros, C.L. Weber // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 1985. – Vol. 3. – P. 727–744.
7. Pursley M.B. Spread-Spectrum Multiple-Access Communications // Multi-User Communication Systems. – Vienna: Springer, 1980. – P. 139–199.
8. Macdonald T.G. The performance of direct-sequence spread spectrum with complex processing and quaternary data modulation / T.G. Macdonald, M.B. Pursley // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 2000. – Vol. 18. – P. 1408–1417.
9. Viterbi A.J. CDMA Principles of Spread Spectrum Communication / A.J. Viterbi. – MA: Addison-Wesley, 1995. – 245 p.
10. Matsumoto M. Mersenne twister: A 623-dimensionally equidistributed uniform pseudorandom number generator / M. Matsumoto, T. Nishimura // ACM Trans. on Modeling and Computer Simulations. – 2017. – Vol. 8. – P. 3–30.
11. Кокин Д.С. Численная модель системы связи с псевдослучайной цифровой модуляцией / Д.С. Кокин, О.Г. Пономарев // Актуальные проблемы радиофизики. Тр. междунар. молодежной научной школы. – Томск: ТНЛ, 2017. – С. 42–47.
12. Кокин Д.С. Временная и фазовая синхронизации в системе связи с псевдослучайной цифровой модуляцией / Д.С. Кокин, О.Г. Пономарев // Актуальные проблемы радиофизики (АПР–2019). VIII Междунар. науч.-практ. конф. – Томск: Изд. дом ТГУ, 2019. – С. 113–117.
13. Kokin D.S. Time and phase synchronization in communication system with a digital pseudo-random modulation / D.S. Kokin, O.G. Ponomarev // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1679. – P. 1–7.
14. 5G; NR; Physical channels and modulation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138200_138299/138211/15.02.00_60/ts_138211v150200p.pdf, свободный (дата обращения: 25.09.2021).

15. SDR Prototype for Clipped and Fast-Convolution Filtered OFDM for 5G New Radio Uplink / S. Gökceli, P.P. Campo, T. Levanen, J. Yli-Kaakinen, M. Turunen, M. Allén, T. Riihonen, A. Palin, M. Renfors, M. Valkama // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 89946–89963.

16. Generalized Fast-Convolution-Based Filtered-OFDM: Techniques and Application to 5G New Radio / J. Yli-Kaakinen, T. Levanen, A. Palin, M. Renfors, M. Valkama // IEEE Transactions on Signal Processing. – 2020. – Vol. 68. – P. 1213–1228.

Кокин Дмитрий Сергеевич

Аспирант каф. радиофизики
Национального исследовательского
Томского государственного университета (НИ ТГУ)
Ленина пр-т, 36, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0002-0287-716X
Тел.: +7-923-423-19-73
Эл. почта: 19nikok941@gmail.com

Пономарев Олег Геннадьевич

Канд. физ.-мат. наук, доцент каф. радиофизики НИ ТГУ
Ленина пр-т, 36, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0002-9872-9902
Тел.: +7-906-947-76-08
Эл. почта: ponomarev@phys.tsu.ru

Kokin D.S., Ponomarev O.G.

Estimation of the relation between the correlator length and the number of subscribers in a communication system with digital pseudo-random modulation

This article examines one of the options for implementing a communication system with pseudo-random digital modulation. For such systems the spreading factor (the signal base) is an important parameter. This work contains the results of operability study for the system in multi-user radio channel. During numerical simulation it was established how the correlator length depends on the number of users simultaneously working in the common frequency band. It is shown that this dependence has a quadratic character.

Keywords: digital modulation, spread spectrum signals, correlation reception.

doi: 10.21293/1818-0442-2021-24-3-38-43

References

1. Varakin L.E. *Sistemy svyazi s shumopodobnymi signalami* [Communication systems with noise-like signals]. Moscow, Radio and Communication Publ., 1985. – 384 p. (in Russ.).
2. Proakis J., Salehi M. [Digital communications]. *McGraw-Hill Science, Engineering, Math*, 2000. – 936 p.
3. Dmitriev A.S., Kletsov A.V., Laktyushkin A.M., Panas A.I., Starkov S.O. [Ultrawideband wireless communications based on dynamic chaos]. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2006, vol. 51, no. 10, pp. 1126–1140. (in Russ.).
4. Kalinin V.I., Radchenko D.E., Cherepenin V.A. *Chislennoe modelirovanie shumovoj sistemy peredachi informacii s rasshireniem spektra* [Numerical Simulation of a Noise Spread Spectrum Information Transmission System]. Moscow, Journal of Radio Electronics, 2014, no. 10, 18 p.

5. Torrieri D. Principles of Spread-Spectrum Communication Systems. Available at: https://www.studmed.ru/torrieri-d-principles-of-spread-spectrum-communication-systems_a64dd824ecf.html/, free. (Accessed: September 25, 2021).
6. Polydoros A., Weber C.L. Detection Performance Considerations for Direct-Sequence and Time-Hopping LPI Waveforms. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, September 1985, vol. 3, pp. 727–744.
7. Pursley M.B. Spread-Spectrum Multiple-Access Communications. Multi-User Communication Systems. *International Centre for Mechanical Sciences (Courses and Lectures)*. Springer, Vienna, 1980, vol. 265, pp. 139–199.
8. Macdonald T.G., Pursley M.B. The Performance of Direct-Sequence Spread Spectrum with Complex Processing and Quaternary Data Modulation. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, August 2000, vol. 18, pp. 1408–1417.
9. Viterbi A.J. CDMA Principles of Spread Spectrum Communication. Reading, MA: Addison-Wesley, 1995, 245 p.
10. Matsumoto M., Nishimura T. Mersenne twister: A 623-dimensionally equidistributed uniform pseudorandom number generator. *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulations*, 2017, vol. 8, pp. 3–30.
11. Kokin D.S., Ponomarev O.G. Chislennaya model sistemy svyazi s psevdosluchajnoj cifrovoj modulyaciej [Numerical model of a communication system with pseudo-random digital modulation]. Tomsk, Publishing house of scientific and technical literature, 2017, pp. 42–47 (in Russ.).
12. Kokin D.S., Ponomarev O.G. Vremennaya i fazovaya sinhronizatsii v sisteme svyazi s psevdosluchajnoj cifrovoj modulyaciej [Time and phase synchronization in a communication system with pseudo-random digital modulation]. Tomsk, TSU Publishing House, 2019, pp. 113–117 (in Russ.).
13. Kokin D.S., Ponomarev O.G. Time and phase synchronization in communication system with a digital pseudo-random modulation. *Journal of Physics. Conference series*, 2020, vol. 1679, pp. 1–7.
14. 5G; NR; Physical channels and modulation. Available at: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138200_138299/138211/15.02.00_60/ts_138211v150200p.pdf/, free (Accessed: September 25, 2021).
15. Gökceli S., Campo P.P., Levanen T., Yli-Kaakinen J., Turunen M., Allén M., Riihonen T., Palin A., Renfors M., Valkama M. SDR Prototype for Clipped and Fast-Convolution Filtered OFDM for 5G New Radio Uplink. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 89946–89963.
16. Yli-Kaakinen J., Levanen T., Palin A., Renfors M., Valkama M. Generalized fast-convolution-based filtered-OFDM: Techniques and application to 5G new radio. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2020, vol. 68, pp. 1213–1228.

Dmitrii S. Kokin

Postgraduate Student, Department of Radiophysics
National Research Tomsk State University (NR TSU)
36, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0002-0287-716X
Phone: +7 923 423 19 73
Email: 19nikok941@gmail.com

Oleg G. Ponomarev

Candidate of Science in Physics and Mathematics,
Assistant Professor, Department of Radiophysics NR TSU
36, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0002-9872-9902
Phone: +7-906-947-76-08
Email: ponomarev@phys.tsu.ru

УДК 621.396.41

А.С. Захлебн

Методика построения ортофотопланов местности с помощью беспилотного квадрокоптера, оснащенного навигационным геодезическим приемником

Разработана и апробирована методика проведения авиационных работ для получения аэрофотоснимков местности, по которым строится геопривязанный ортофотоплан местности. Методика применима к беспилотному летательному аппарату DJI Phantom 4 Pro с интегрированной платой глобальной навигационной спутниковой системой (ГНСС) на борту для получения точных координат центров аэрофотоснимков. Предложенная методика обеспечивает достаточное качество получаемых исходных материалов (аэрофотоснимков, данных спутниковых наблюдений) для дальнейшего использования их в построении геопривязанного ортофотоплана местности, соответствующего масштабу 1:500.

Ключевые слова: аэрофотоснимок, БПЛА, ортофотоплан местности, экспозиция, координата, контрольная точка, пункт планово-высотного обоснования.

doi: 10.21293/1818-0442-2021-24-3-44-49

Современные методы дистанционного зондирования земной поверхности постоянно совершенствуются. Различные результаты аэрофотосъемки и космической съемки находят все большее применение в различных областях деятельности человека [1–5]. Для построения геопривязанного ортофотоплана местности больше не нужно прибегать к дорогостоящим методам получения аэрофотоснимков (спутниковая съемка, малая авиация). Это стало возможным благодаря стремительному развитию отрасли сверхмалой беспилотной авиации. За один вылет беспилотный летательный аппарат (БПЛА) способен отснять от нескольких десятков до нескольких тысяч гектар территории с большим количеством снимков, которые впоследствии будут использованы для построения геопривязанных ортофотопланов местности.

Для целей кадастровых и некоторых других работ требуются точные ортофотопланы местности с пространственным разрешением от 5 см/пиксель и выше, точность определения плановых координат таких ортофотопланов местности должна составлять от 10 см и выше. Чтобы обеспечить такую высокую географическую привязку итоговых моделей используют два метода. Первый заключается в том, что перед началом авиационных работ на местности закладываются пункты планово-высотного обоснования (ПВО). Это небольшие контрастные объекты на местности, координаты которых точно определены инструментальным методом. Пункты ПВО должны быть такими, чтобы их легко можно было идентифицировать на полученных с БПЛА изображениях.

Географическая привязка раstra осуществляется на этапе камеральной обработки, используя координаты этих пунктов. Во втором методе для обеспечения высокой точности геопространственных данных используются БПЛА с геодезическими приемниками на борту и наземная базовая станция, которая устанавливается в точке с известными координа-

тами и осуществляет наблюдение за созвездием спутников, а также запись данных с частотой от 1 до 10 Гц. На этапе камеральной обработки данные спутниковых наблюдений с БПЛА и базовой станции обрабатываются в специализированных ПО, в результате чего рассчитываются точные координаты центров фотографирования, которые учитывают крен, тангаж и другие параметры полета БПЛА в момент срабатывания затвора камеры. Ранее такие работы проводились в основном с использованием БПЛА самолетного типа, так как за один полет он способен охватить большую по площади территорию. В то же время БПЛА самолетного типа имеют ряд недостатков, которые обусловлены их конструктивными особенностями: нужно иметь большую открытую площадку для взлета и посадки, использовать катапульту, отсутствует возможность в короткий срок прерывать и возобновлять полет.

Все это делает использование БПЛА самолетного типа менее удобным и более опасным по сравнению с БПЛА вертолетного типа, которому для взлета и посадки требуется всего несколько квадратных метров открытого пространства, а их производительность становится сопоставима с некоторыми БПЛА самолетного типа. Такие БПЛА способны летать ниже и медленнее, что в конечном итоге обеспечивает высокое пространственное разрешение конечного ортофотоплана местности. Проблемой является то, что в основном имеющиеся описанные в литературе методы и ГОСТы [10] подразумевают использование БПЛА самолетного типа, не учитывая специфику использования БПЛА вертолетного типа. В данной статье рассматривается методика, при которой конечной целью аэрофотосъемки является построение геопривязанного ортофотоплана местности для целей кадастра масштаба 1:500 с телевизионной камеры БПЛА вертолетного типа с геодезическим приемником на борту. Схема реализации данной методики приведена на рис. 1.

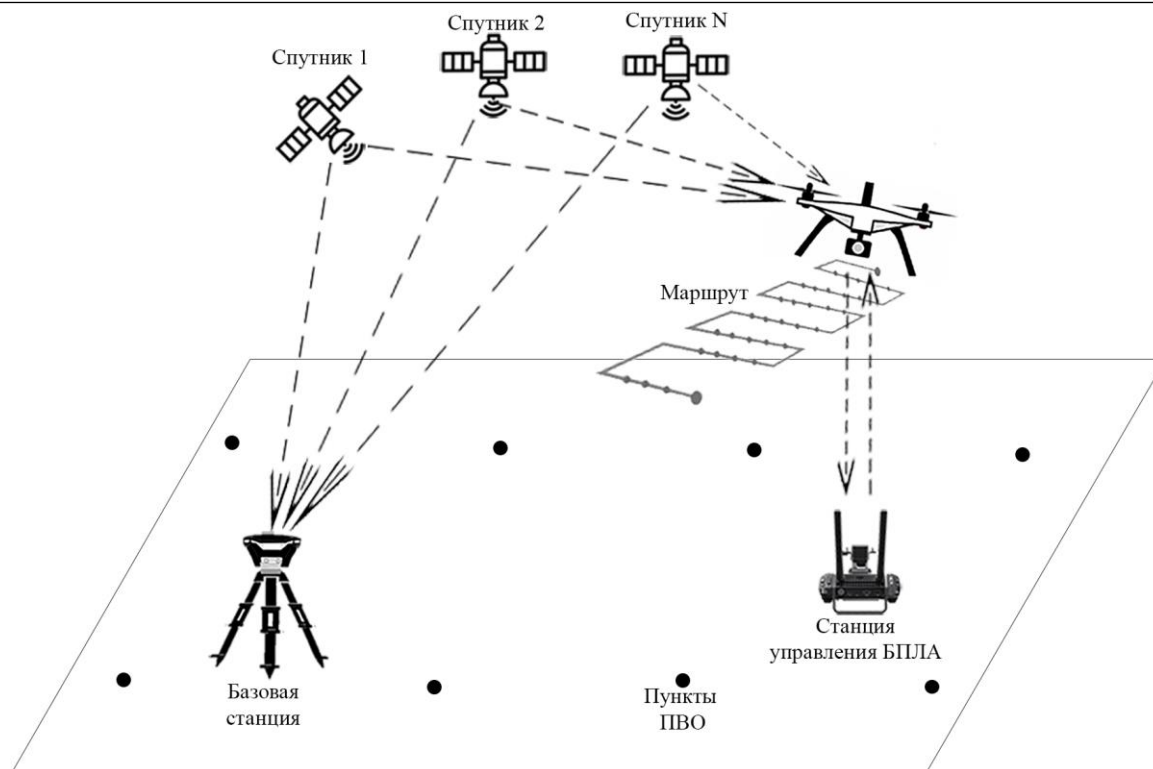


Рис. 1. Схема реализации методики

В качестве БПЛА использовался DJI Phantom 4 PRO. В настоящее время он занимает значительную долю рынка среди БПЛА вертолетного типа. Отличительной способностью данного БПЛА является сравнительно невысокая стоимость по сравнению с аналогами. Квадрокоптер оснащен камерой с пространственным разрешением 20 мегапикселей на гиростабилизирующем трехосевом подвесе. Основные характеристики БПЛА приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные характеристики БПЛА

Параметр	Значение
Максимальная скорость	20 м/с
Максимальная высота полета	500 м
Удаленность полета	5000 м
Система позиционирования	GPS, ГЛОНАСС
Разрешение матрицы камеры	20 Мпикс
Продолжительность полета	До 28 мин

Беспилотный летательный аппарат дополнительно оснащается высокоточной ГНСС-платой AGNSS L1/L2 компании «Теодрон». Данная плата интегрируется на место штатного GPS-приемника, обеспечивает навигацию квадрокоптера и осуществляет запись данных со спутников в режиме кинематики. Так как изначально координаты центров фотографирования определяются неточно, плата AGNSS L1/L2 позволяет вычислить точные координаты центров фотографирования методом РПК (Post Processing Kinematic), имея данные спутниковых наблюдений с БПЛА и данные, полученные с базовой станции, установленной на точке с известными координатами [6, 7]. Ее отличительной особенностью от конкурентов

(например, от Emlid Reach M+) является наличие платы синхронизации Ashot. Основные характеристики платы представлены в табл. 2.

Таблица 2

Характеристики ГНСС платы AGNSS L1/L2

Параметр	Значение
Расстояние до базы, км	До 60
Время инициализации, с	До 30
Несущие частоты, МГц	L1 (1575,42), L2 (1227,6)
Частота записи спутниковых данных, Гц	5, 10

Плата синхронизации создает временную метку события при срабатывании механического затвора телевизионной камеры в середине времени экспозиции. Тем самым в постобработке данных спутниковых наблюдений можно получить высокоточные координаты центров фотографирования.

В качестве оборудования для создания планово-высотного обоснования на местности использовался комплект спутникового геодезического оборудования от компании EFT. В качестве базовой станции использовался приемник EFT S1.

В качестве подвижного ровера используется приемник EFT M2.

Основные технические характеристики приемников представлены в табл. 3.

Подготовительные работы

Для проверки ортофотоплана местности либо его привязки используются пункты планово-высотного обоснования (ПВО). Они представляют собой контрастные точки на местности, которые легко детектируются при камеральной обработке снимков [4]. В качестве пунктов ПВО, как правило, исполь-

зуют контрастные диски, закрепленные на поверхности земли, или нарисованные краской круги диаметром 10–15 см. Если на борту БПЛА нет высокоточной ГНСС-платы и геопривязка модели будет осуществляться по опознавательным знакам, пункты ПВО рекомендуется размещать равномерно по исследуемой местности на расстоянии 200–50 м друг от друга.

Таблица 3

Основные технические характеристики спутниковых геодезических приемников EFT M2 и EFT S1

Параметр	Значение
Поддерживаемые группировки спутников	GPS, ГЛОНАСС, Galileo, SBAS, Beidou, QZSS, IRNSS, L-Band
Точность измерений в режиме кинематики с постобработкой (ППК)	В плане: 8 мм + 1 мм/км – По высоте: 15 мм + 1 мм/км
Точность измерений в режиме кинематики в реальном времени (РТК)	В плане: 8 мм + 1 мм/км По высоте: 15 мм + 1 мм/км
Частота записи данных	От 1 до 50 Гц

Определение точных координат пунктов происходит с помощью спутникового оборудования в режиме РТК (Real Time Kinematic) [5].

Для осуществления данных работ один из ГНСС-приемников (базовый-неподвижный) необходимо разместить на открытом пространстве в точке с известной координатой рядом с местом, где планируются авиационные работы. Как правило, это пункты государственной геодезической сети (ГГС).

Базовая станция в режиме реального времени по каналу CSD передает поправки в заданной системе координат на второй ГНСС-приемник, который используется для определения координат пунктов ПВО.

Создание полетного задания

Для создания полетного задания для беспилотных летательных аппаратов существует множество программ и сервисов. В табл. 4 приведен сравнительный анализ наиболее часто используемых программных сервисов.

В данной работе для составления полетного задания использовался сервис TeoFly. Этот сервис является наиболее гибким с точки зрения настроек полета, а также отличается наиболее стабильной работой.

Таблица 4

Сравнительный анализ ПО для составления полетных заданий

Название программного обеспечения	Корректировка экспозиции в полете	Возможность задания угла наклона камеры	Продолжение миссии с последней точки
Drone Deploy	–	+	+
Pix4d	–	+	–
TeoFly	+	+	+
MapPilot	–	+	+

Основные параметры полета для получения аэрофотоснимков во многом зависят от рельефа

местности и расположенных на ней объектов. В эксперименте использовались рекомендации, приведенные в ГОСТ Р 59328-2021 [10].

Основные параметры полетного задания, используемые в проведенном эксперименте, приведены в табл. 5.

Таблица 5

Параметры полетного задания

Параметр	Значение
Перекрытие аэрофотоснимков, %	80 / 60
Высота полета, м	110
Скорость полета, м/с	9
Исследуемая площадь за один полет, га	45

Предварительная настройка БПЛА

Перед началом авиационных работ необходимо проверить общее состояние беспилотного летательного аппарата: отсутствие дефектов на корпусе БПЛА, исправность двигателей, прочность пропеллеров, работу подвеса камеры, значения показаний компасов и инерциальной системы.

В качестве полетной программы используется ПО Litchi. Ее главная отличительная особенность состоит в том, что во время полета есть возможность изменять параметры камеры и отслеживать все показатели датчиков БПЛА: скорость, высота полета, количество отслеживаемых спутников, онлайн-трансляция с камеры БПЛА, положение БПЛА на маршруте.

Авиационные работы

Перед взлетом БПЛА базовая станция, установленная на пункте государственной геодезической сети, переключается в режим статического наблюдения за спутниками с частотой от 1 до 5 Гц.

В качестве точки взлета БПЛА выбирается открытая территория вдали от высоких зданий и деревьев [7]. Когда квадрокоптер получает сигнал от достаточного количества спутников и определяет свое местоположение, производится взлет. Производится набор рабочей высоты. На рабочей высоте, прежде чем отправить БПЛА на маршрут, производится настройка фокуса камеры [8–13]. Камера опускается в надири, производится ее фокусировка на местности, после чего фокус камеры блокируется и остается неизменным на протяжении всего маршрута.

После того как набрана рабочая высота и выполнена фокусировка камеры, БПЛА отправляется на первую стартовую точку.

Параллельно выполняется настройка экспозиции камеры.

В табл. 6 приведены основные настройки телевизионной камеры, применимые для аэрофотосъемочных работ на БПЛА Phantom 4 Pro.

Рекомендуется использовать выдержку от 1/500 до 1/1600 с. При выдержке 1/2000 с и короче перестает работать механический затвор камеры и метка события фотографирования создается неверно [14]. Поэтому в процессе полета нужно постоянно отслеживать этот параметр и при необходимости изменять значение диафрагмы.

Таблица 6

Основные настройки камеры	
Параметр	Значение
Формат изображения	3:2
Режим работы камеры	A (приоритет диафрагмы)
Баланс белого	Солнечно/пасмурно
ISO	100–200
Диафрагма	2,8–8
Экспозиция	1/500–1/1600
Формат сжатия	JPEG
Механический затвор камеры	Включен

После завершения выполнения полетного задания и приземления выключается питание БПЛА, затем питание базового приемника.

Полевой контроль полученного материала

На последнем этапе проведения авиационных работ проводится проверка корректности полученных материалов. В частности, проверяется карта памяти БПЛА на предмет наличия аэрофотоснимков и визуально оценивается их качество.

Также проводится проверка данных спутниковых измерений по отношению сигнал/шум. Для этого с ГНСС-приемника БПЛА и с базовой станции архивируются RINEX-файлы на полевой компьютер. На частотах L1 сигнал от спутника считается качественным, если отношение сигнал/шум лежит в пределах 30–50 дБГц. На частотах L2 сигнал от спутника считается качественным, если отношение сигнал/шум лежит в пределах 25–50 дБГц.

Апробирование методики

Методика была использована при создании ортофотоплана местности садового некоммерческого товарищества (СНТ), располагающегося в Томском районе. Общая площадь съемки составила 40 га. На территории было равномерно расположено 6 контрольных пунктов ПВО. В результате проведения авиационных работ и обработки полученного материала максимальная плановая ошибка определения координат составила 7,59 см. Максимальное отклонение высотной отметки 7,33 см. Пространственное разрешение полученного ортофотоплана 2,28 см/пиксель.

Методика использовалась при подсчете насыпи полезных ископаемых [15]. Итоговый результат подсчета отличается от традиционного метода маршейдерской съемки на 0,57%.

Предлагаемая методика проведения авиационных работ используется при выполнении договора № 651ГУЦЭС8-D3/63775 о предоставлении гранта на выполнение научно-исследовательских работ и оценку перспектив коммерческого использования результатов в рамках реализации инновационного проекта «Разработка технологии подеревной таксации леса по данным аэрофотосъемки с беспилотных летательных аппаратов» программы УМНИК. Грантополучателем и руководителем проекта является автор настоящей статьи.

Методика будет использоваться при создании цифровой модели полигона для испытания активном-импульсных телевизионных систем, разрабатывае-

мых на кафедре телевидения и управления ТУСУРа [16, 17].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-10200 в ТУСУРе.

Заключение

Описанная методика проведения авиационных работ позволяет создавать ортофотопланы и цифровые модели местности с пространственным разрешением менее 5 см/пиксель.

Ошибка в определении географических координат объектов на ортофотоплане и цифровой модели местности менее 10 см. Можно утверждать, что предложенная методика проведения авиационных работ с помощью БПЛА вертолетного типа DJI Phantom 4 Pro с ГНСС приемником на борту соответствует нормам и стандартам топографических планов масштаба 1:500 и может быть применима на практике при изготовлении топографических планов реальных объектов.

Литература

1. Захлебин А.С. Построение ортофотоплана местности с использованием БПЛА вертолетного типа DJI PHANTOM 4 // XIV науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления». – Томск: ТУСУР, 2018. – С. 159–161.
2. Катаев М.Ю. Возможности космического мониторинга для целей сельского хозяйства Томской области / М.Ю. Катаев, А.А. Скугарев, И.Б. Сорокин // Доклады ТУСУР. – 2017. – № 3 (20). – С. 186–190.
3. Применение беспилотных летательных аппаратов для ведения землеустройства, кадастра и градостроительства / Н.Г. Овчинникова, Д.А. Медведков. – Ростов н/Д: Донской гос. техн. ун-т, 2019. – Т. 3, № 1. – С. 98–108.
4. Баклыков М.А. Применение модифицированных дронов при проведении топографо-геодезических работ // Автоматизация в промышленности. – 2020. – № 2. – С. 19–21.
5. Худайбердин А.Р. Аэрофотосъемка как метод дистанционного зондирования // Актуальные проблемы геодезии, кадастра, рационального земле- и природопользования: матер. междунар. науч.-практ. конф., Тюмень, 2017. – Тюмень: Тюм. индустр. ун-т, 2018. – С. 196–199.
6. Ессин А.С. Разработка методики пространственной фотограмметрической обработки материалов цифровой аэрофотосъемки, полученной с беспилотного летательного аппарата / А.С. Ессин, С.С. Ессин // Сб. матер. науч. конф. «ГЕО – Сибирь–2007». – Т. 3. – Новосибирск: СГГА, 2007. – С. 48–52.
7. Завгородняя Д.В. Использование ГНСС-технологий для определения пространственного местоположения беспилотного летательного аппарата // Инновационные технологии в науке и образовании: сб. статей VI Междунар. науч.-практ. конф. – Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение», 2017. – С. 279–282.
8. Евсейчик П.А. Развитие референчных станций ГНСС и их применение в кадастровой деятельности // Электронный сб. статей по матер. XXIX студенческой междунар. науч.-практ. конф. – Новосибирск: АНС «СибАК», 2017. – С. 39–43.
9. Приказ Минэкономразвития от 17 августа 2012 № 518. Москва. «О требованиях к точности и методам определения координат характерных точек границ земельного участка, а также контура здания, сооружения или объекта незавершенного строительства на земельном участке» [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_140001, свободный (дата обращения: 05.06.2021).

10. ГОСТ Р 59328–2021. Аэрофотосъемка топографическая. Технические требования. Утверждено Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200178079>, свободный (дата обращения: 06.06.2021).

11. Инструкция по фотограмметрическим работам при создании цифровых топографических карт и планов, ГКИНП (ГНТА)-02-036-02, утв. приказом Федеральной службы геодезии и картографии России от 11.06.2002 г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200037140>, свободный (дата обращения: 02.06.2021).

12. Ашиккалиев А.Х. Аэрофотосъемка земельного участка в целях оптимизации земельного кадастра / А.Х. Ашиккалиев, О.А. Канайкина, А.Б. Аршимбаева // Магтер. конф. ГНИИ «Нацразвитие». – СПб.: Гуманитарный нац. иссл. ин-т «Нацразвитие», 2018. – С. 35–38.

13. Мишиева А.Т. Использование БПЛА для составления ортофотоплана и кадастрового плана // Мониторинг. Наука и технологии. – 2021. – № 1(47). – С. 84–89. doi: 10.25714/MNT.2021.47.010

14. Development of a digital surface model and a digital terrain model based on ERS data. 3rd International Symposium on Engineering and Earth Sciences / I.G. Gairabekov, A.I. Hamzatov, A.T. Mishieva, E.I. Ibragimova, B.I. Gairabekov, A.I. Gayrabekova // 3rd International Symposium on Engineering and Earth Sciences. – 2020 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/905/1/012025/pdf>, свободный (дата обращения: 01.06.2021).

15. Захлебн А.С. Подсчет объема насыпи полезных ископаемых с использованием БПЛА вертолетного типа DJI Phantom 4 PRO // XV науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления». – Томск: ТУСУР, 2019. – С. 195–196.

16. Active-pulse television measuring systems images space-time filtration by range / V. Kapustin, A. Movchan, M. Kuryachiy, E. Chaldina // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – P. 1–6.

17. Захлебн А.С. Построение геопривязанного ортофотоплана участка местности по изображениям с телевизионной камеры БПЛА вертолетного типа / А.С. Захлебн, А. Калибеков, М.И. Курячий // Электронные средства и системы управления: матер. докл. междунар. науч.-практ. конф. – Томск: ТУСУР, 2020. – № 1–2. – С. 187–189.

Захлебн Александр Сергеевич

Аспирант, ассистент кафедры телевидения и управления (ТУ) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-923-433-46-06
Эл. почта: aerosnimok@gmail.com

Zakhlebin A.S.

Method to produce orthomosaics of the terrain using a helicopter-type UAV with an on-board navigation geodetic receiver

The article proposes a method allowing to obtain aerial photographs that are used afterwards to build a georeferenced or-

thophoto map of the area. The method is applicable to the DJI Phantom 4 Pro unmanned aerial vehicle with an integrated Global Navigation Satellite System (GNSS) on board to obtain precise coordinates of the aerial photographs centers. The proposed method provides sufficient quality of the initial materials obtained (aerial photographs, satellite observation data) for their further use in constructing a georeferenced orthomosaic map of the area corresponding to a scale of 1: 500.

Keywords: aerial photograph, UAV, orthophotomap of the area, exposure, coordinate, control point, point of planning and altitude justification.

doi: 10.21293/1818-0442-2021-24-3-44-49

References

1. Zakhlebin A.S. [Creation of an orthomosaic terrain using a helicopter-type UAV DJI PHANTOM 4] *XIV Scientific and Practical Conference «Electronic Means and Control Systems» Tomsk, TUSUR, 2018*, pp.159–161 (in Russ.).

2. Kataev M.Yu., Skugarev A.A., Sorokin I.B. [Opportunities of space monitoring for the purposes of agriculture of the Tomsk region]. *Proceedings of TUSUR University, 2017*, no. 3 (20), pp.186–190 (in Russ.).

3. Ovchinnikova N.G., Medvedkov D.A. [The use of unmanned aerial vehicles for land management, cadaster and urban planning]. *Rostov-on-Don, Don State Technical University, 2019*, vol. 3, no. 1, pp. 98–108.

4. Baklykov M.A. [The use of modified drones during topographic and geodetic works]. *Automation in industry. 2020*, no. 2, pp. 19–21 (in Russ.).

5. Khudaiberdin, A.R., Oleinik A. M. [Aerial photography as a method of remote sensing]. *Tyumen Industrial University. Tyumen, 2018*, pp. 196–199 (in Russ.).

6. Essin, A.S., Essin S.S. [Development of a methodology for spatial photo-grammetric processing of digital aerial photography materials obtained from an unmanned aerial vehicle]. *Sat. materials scientific. conf. «GEO – Siberia–2007» Novosibirsk, SGGG publ., 2007*, v. 3, pp. 48–52. (in Russ.).

7. Zavgorodnyaya D.V. [Use of GNSS technologies for determining the spatial location of an unmanned aerial vehicle] *Innovative technologies in science and education, collection of articles of the VI International scientific and practical conference. Penza, ICNS Science and Education publ., 2017*. pp. 279–282 (in Russ.).

8. Evseichik P.A. [Development of GNSS reference stations and their application in cadastral activities]. *Electronic collection of articles based on the materials of the XXIX student international scientific and practical conference. Novosibirsk, ANS «SibAK», 2017*. pp. 39–43 (in Russ.).

9. Order of the Ministry of Economic Development of August 17, 2012 No. 518. Moscow. [On the requirements for accuracy and methods for determining the coordinates of characteristic points of the boundaries of a land plot, as well as the outline of a building, structure or an object of unfinished construction on a land plot]. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_140001, free (Accessed: June 05, 2021) (in Russ.).

10. GOST P 59328–2021 [Topographic aerial photography. Technical requirements. Approved by the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200178079>, free (Accessed: June 06, 2021) (in Russ.).

11. Instructions for photogrammetric work when creating digital topographic maps and plans, GKIINP (GNТА) -02-036-02, approved by order of the Federal Service for Geodesy and Cartography of Russia from 11.06.2002, no. 84-PR. Moscow, TsNIIGAiK, 2002 (in Russ.).

12. Ashikkaliev A.Kh., Kanaykina O.A., Arshimbaeva AB. [Aerial photography of a land plot in order to optimize the land cadastre]. *Materials of the conferences of the National Research Institute of Development. June 2018: Collection of selected articles*, St. Petersburg, June 25–30, 2018. St. Petersburg, Private scientific and educational institution of additional professional education Humanitarian National Research Institute «Nats Development», 2018, pp. 35–38 (in Russ.).

13. Mishieva, A.T. [Use of UAVs for drawing up an orthomosaic and cadastral plan] *Monitoring. Science and technology*. 2021, no. 1 (47), pp. 84–89. DOI 10.25714.MNT.2021.47.010 (in Russ.).

14. Gairabekov I.G., Hamzatov A.I., Mishieva A.T., Ibragimova E.I., Gairabekov M.-B.I., Gayrabekova A.I. [Development of a digital surface model and a digital terrain model based on ERS data] Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/905/1/012025/pdf>, free (Accessed: June 01, 2021).

15. Zakhlebin A.S. [Calculation of the volume of the embankment of minerals using a helicopter-type UAV DJI Phantom 4 PRO] *XV Scientific and Practical Conference «Electronic Means and Control Systems»*. Tomsk, TUSUR, 2019. pp. 195–196 (in Russ.).

16. Kapustin V., Movchan A, Chaldina E [Active-pulse television measuring systems images space-time filtration by range]. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020, vol. 1488, pp. 1–6.

17. Zakhlebin A.S, Kalibekov A, Kuryachiy M.I. [Construction of a georeferenced orthophotomap of a terrain area based on images from a helicopter-type UAV television camera]. *Electronic Means and Control Systems. Proceedings of the international scientific-practical conference*. Tomsk, TUSUR, 2020, no. 1–2, pp. 187–189.

Alexander S. Zakhlebin

Postgraduate Student, Assistant
Department of Television and Control (TU),
Tomsk State University of Control Systems
and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-923-433-46-06
Email: aerosnimok@gmail.com

УДК 528.72:004.93

М.Ю. Катаев, Е.Ю. Карташов, А.А. Кузнецов

Методика кластеризации сельскохозяйственных полей по RGB-изображениям беспилотных летательных аппаратов

Технологии дистанционного зондирования Земли, которые развиваются на основе спутникового зондирования и в последнее время беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), предоставляют значительный потенциал в рамках приложений умного (точного) земледелия. Датчики (например, цифровые RGB-камеры) в форме изображений позволяют получать в реальном масштабе времени данные об окружающей среде исследуемой территории. Датчики, установленные на беспилотных летательных аппаратах, могут использоваться в различных приложениях, связанных с оценкой качества вспашки, всходов озимой пшеницы, выращиванием сельскохозяйственных культур и др. Это возможно за счет захвата больших по размеру территорий набором изображений с низким временным (несколько часов на 1000 га), но высоким пространственным разрешением (несколько сантиметров). Ожидается, что технологии дистанционного зондирования Земли произведут революцию в сельском хозяйстве, позволив принятие решений за несколько дней, а также снижение затрат и увеличение урожая. Несмотря на существенное развитие, одно из направлений использования БПЛА в умном сельском хозяйстве еще не является таким надежным и точным, как ожидалось, в основном из-за проблем, возникающих при сборе, обработке и анализе изображений. Главная проблема в том, что до сих пор нет стандартизированного рабочего процесса, включающего этапы от сбора до визуализации результатов при использовании БПЛА в приложениях, связанных с сельским хозяйством. Одним из слабых мест многих технологий обработки изображений является недостаточное качество кластеризации, где каждый найденный кластер связан с определенным типом поверхности. Рассмотрено применение изображений, полученных с помощью БПЛА, для решения задач умного сельского хозяйства. Обсуждается методика кластеризации, связанная с параметрическим представлением гистограмм яркости цветовых пространств и индексов зелености (Greenness Indexes). Приводятся результаты обработки изображений.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, беспилотный летательный аппарат, обработка изображений, умное земледелие.

doi: 10.21293/1818-0442-2021-24-3-50-56

За последние годы растет объем инвестиций в аграрный сектор [1]. Целью этих инвестиций является достижение роста производительности к 2030 г., [2] позволяющее полностью удовлетворить потребности населения России. Технологии дистанционного зондирования Земли с помощью спутников и беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) могут предоставить высокий потенциал в умном земледелии, что обеспечит повышение производительности [3]. Парадигма дистанционного зондирования Земли предлагает перспективу развития умного (точного) земледелия, позволяя управление обрабатываемыми полями в режиме существенно более быстрого времени, чем это позволяют текущие технологии [4]. В этом плане технологии дистанционного зондирования Земли предназначены для мониторинга сельскохозяйственных культур с целью автоматизации различных операций. К ним можно отнести мониторинг вспашки полей, посева, роста растений, выявления болезней и т.д. В этом контексте эти технологии могут помочь в получении точной и своевременной информации для сельскохозяйственных полей.

Дистанционное зондирование Земли считается одной из самых важных технологий для достижения точности получения пространственно-временной информации для умного земледелия. Такой подход позволяет контролировать многие параметры сельскохозяйственных культур (растительности) через многоспектральные изображения. Однако спутниковые изображения имеют достаточно низкое про-

странственное и временное разрешение получаемых изображений, кроме того, помехой является облачность. Другой аспект связан с временем получения изображения, его обработки и доставки потребителю. Использование пилотируемых самолетов обычно приводит к высоким финансовым затратам, что может позволить себе совсем небольшое количество сельских хозяйств. Применение систем дистанционного зондирования на базе беспилотных летательных аппаратов является шагом вперед в сельском хозяйстве, так как позволяет наблюдать за посевами практически в любых условиях, получать данные более просто и экономично по сравнению с предыдущими методами.

БПЛА можно рассматривать как технологию дистанционного зондирования в умном земледелии за счет способности летать на малых высотах (10–200 м), получать изображения сельскохозяйственных культур со высоким пространственным разрешением (несколько сантиметров). Кроме того, БПЛА как части системы мониторинга позволяют менять пространственное разрешение (фактически высоту полета) по желанию пользователя [5].

Важно отметить, что в настоящее время отсутствует стандартизированный рабочий процесс, связанный с получением, обработкой и анализом изображений, что является одним из основных недостатков, который влияет на более широкое использование систем БПЛА на практике. К этому факту приводит множество разнородных процедур и методов,

которые применяются для одной и той же цели, что не всегда приводит к лучшему результату. В этой работе нами предлагается простая методика кластеризации изображений БПЛА, которая позволяет выделить определенные типы поверхности по их цветовым характеристикам, представленным гистограммами яркости. Эта методика расширяет возможность применять изображения БПЛА для умного сельского хозяйства при мониторинге полей сельскохозяйственных культур.

Применение БПЛА в умном земледелии

На сегодняшний день технологии БПЛА успешно используются в различных приложениях сельского хозяйства, например, определение плотности всходов, внесение гербицидов на конкретных участках, определение дефицита воды, обнаружение заболеваний растений и др. Используя информацию в виде изображений, полученную с БПЛА, можно принять несколько решений, например, для решения обнаруженных проблем оценки урожайности, картирования ареалов сорняков на поле, мониторинг роста растительности. Одним из самых популярных приложений БПЛА в точном земледелии является картографирование сорняков [6], когда необходимо выделить локальные участки поля, где наблюдаются ареалы сорняков, чтобы дифференцированно внести гербициды вместо того, чтобы распылять их по всему полю. Важно отметить, что типичные способы пешеходного анализа полей [7] являются локально эффективными, но невозможны при контроле значительных территорий.

Отсутствие простых, удобных, точных средств для систематического наблюдения за прогрессом роста растений считается одним из основных препятствий на пути повышения объема и качества продукции сельского хозяйства. Эта проблема также усугубляется регулярностью изменчивости погодных условий, что влияет на рост сельскохозяйственных культур и изменение времени созревания. Регулярный сбор информации и визуализация территории полей с посевами с помощью БПЛА предоставляют расширенные возможности для мониторинга роста растений, оценки биомассы и др. [8].

Цель постоянного и непрерывного наблюдения за полями с посевами на разных стадиях развития заключается в определении из полученных изображений с БПЛА различных факторов (атмосфера, плодородие почвы и т.д.), которые могут повлиять на конечные показатели будущего урожая. Особенно это важно для мониторинга участков с большой неоднородностью (например, большое количество осколков леса и др.), когда достигается более высокая эффективность именно использования БПЛА, оснащенного цифровой RGB или мультиспектральной камерой.

Технология получения изображений поверхности с помощью БПЛА

Беспилотный летательный аппарат включает в себя следующие ключевые элементы:

1) летательный аппарат;

2) систему управления полетом;

3) систему радиосвязи;

4) измерительные устройства (цифровая камера, датчик освещенности, датчик расстояния до поверхности и др.);

5) программное обеспечение.

Известны разнообразные типы беспилотных летательных аппаратов, которые могут быть использованы для получения картографии поверхности в разнообразных практических приложениях, в том числе и в сельском хозяйстве [9]. Представим наиболее популярные типы БПЛА. Беспилотные летательные аппараты с крыльями (самолетного типа), которым требуется взлетно-посадочная полоса для взлета с земли или с помощью катапульты. Этот тип БПЛА отличается возможностью летать на высоких скоростях, высотах длительное время и нести достаточно большую полезную нагрузку. Беспилотный вертолет включает в себя корпус и винты, представляя собой мультикоптер (квадрокоптер – четыре винта, гексакоптер, октокоптер и др.). Эти типы БПЛА устойчивы в полете, однако имеют небольшой запас времени в полете и малую полезную нагрузку.

Разнообразные датчики, установленные на беспилотных летательных аппаратах, являются мощными системами получения значительной по объему информации, которая необходима для решения практических задач. Одним из таких датчиков, являющимся самым распространенным на практике, является цифровая камера (RGB или мультиспектральная), которая позволяет фиксировать отраженное солнечное излучение. Такие камеры имеют низкое спектральное разрешение, но высокое пространственное и временное разрешение, что необходимо в задачах мониторинга различных характеристик растительности [10].

Кроме того, получение изображений с борта БПЛА возможно при разнообразных атмосферных условиях (как в солнечные, так и в пасмурные дни), учитывая временные рамки дня, чтобы избежать значительных перепадов яркости отраженного от поверхности излучения [11]. Для оценки состояния растений на поле с помощью БПЛА обычно получают набор перекрывающихся изображений посевов с лицевых и боковых сторон (типично перекрытие от 50 до 70%). В зависимости от решаемой задачи подбирается высота полета БПЛА, что определяет пространственное разрешение пикселя изображения (типично это от 1 до 10 см/пиксель или более).

На рис. 1 представлена типичная схема проведения измерений с помощью БПЛА, который начинает облет поля по определенному, заранее проработанному маршруту со скоростью V на высоте H . При облете поля размером (x, y) изображения производятся с заданным шагом по времени, обеспечивающим необходимое перекрытие изображений. Для полетов выбирается время полетов (10–5 ч, когда Солнце находится максимально высоко) и безветренная (слабоветренная) погода (до 10 м/с), чтобы

минимизировать возможные смещения БПЛА воздушными потоками (вертикальные или горизонтальные).

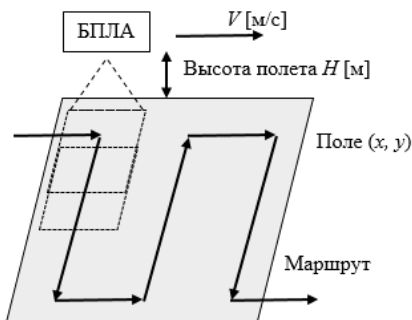


Рис. 1. Схема проведения измерений с помощью БПЛА

Далее полученные изображения сшиваются в одно изображение, мозаику, пример показан на рис. 2.

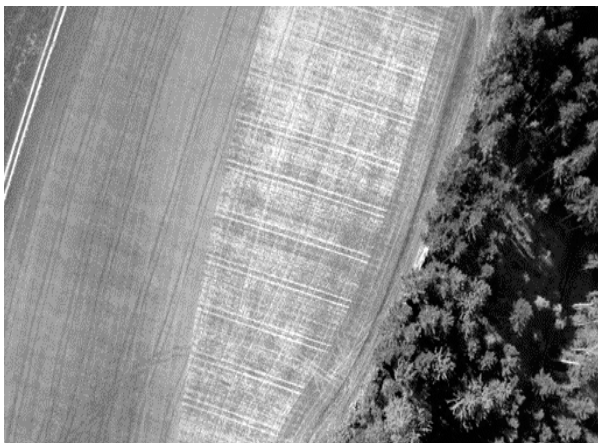


Рис. 2. Пример мозаики сельскохозяйственного поля

На изображении представлены типы поверхности, необходимые для анализа, как поле необработанное (слева, назовем поле1), обработанное поле (в центре изображения, назовем поле2) и лес (справа). Важной задачей кластеризации такого типа изображений является выделение масок поля1 и поля2 для того, чтобы изучать свойства только этих территорий.

Кластеризация изображения

Задача кластеризации традиционно [12] формулируется как разбиение изображения на некоторое множество областей, которые связаны с объектами, представленными на нем. В результате решения задачи кластеризации получается некоторое количество однородных областей. В настоящее время известно множество математических подходов к решению этой задачи, однако в узких практических приложениях до сих пор существуют проблемы качества кластеризации. Подходы разделяются по типу изображения: черно-белое, монохромное, цветное и многоспектральное, а также по признакам, которые учитываются при разбиении изображения на области (цвет, форма, границы и т.д.). Приведем кратко типичные варианты решения, которые эффективны для разных типов изображений. Одними из самых простых по реализации являются методики разбиения изображения на однородные области по значе-

ниям яркости с помощью разного типа порогов (локальные, глобальные или адаптивные). Кластеризация в пространстве цветов, когда значения яркости RGB-каналов пикселей собираются в кластеры по критерию близости (вычисление расстояния). Кластеризация в пространстве цветов на основе математического аппарата нечеткой логики (fuzzy logic). Кластеризация с помощью разбиения изображения проведением границ с помощью вычисления первой производной (методики Собела, Кэнни, Робертса и т.д.) или второй производной (оператор Лапласа). Существует подход, реализованный на принципах морфологии, самым известным в этом направлении является кластеризация по водоразделам. Известны и другие подходы [13].

Анализ подходов кластеризации к изображениям (рис. 2), имеющим специфику, с одной стороны, типизации и, с другой стороны, похожести является сложным и требующим исследований. Проблемой разделения областей на однородные области является значительное перекрытие признаков, в том числе и цветовых, между собой, что представлено на рис. 3.

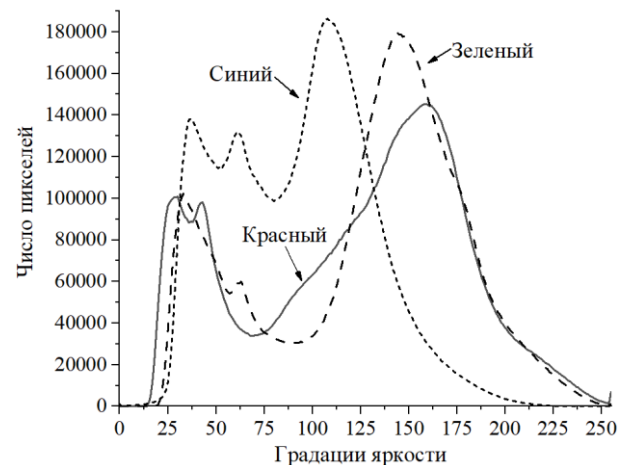


Рис. 3. Гистограммы яркости каналов RGB-изображения, представленного на рис. 2

Из рис. 3 видно, что цветовые признаки каналов R, G, B перекрываются, имеют несколько пиков, которые явно соответствуют разным типам поверхности, и все классические методики кластеризации могут выдавать неточные результаты (например, часть поля1 представить полем2). Преодолеть эту проблему нами предлагается за счет увеличения числа признаков за счет привлечения разных цветовых пространств и индексов зелени [14].

Предлагаемая методика кластеризации основана на получении гистограмм цветовых пространств и получении характеристик пиков (амплитуда, центр и полуширина справа и слева). Такой вариант решения, на наш взгляд, позволит уйти от зависимости условий освещения, так как при этом форма гистограммы может меняться, а характеристики формы являются более стабильными. Далее, получив статистические разбросы характеристик гистограмм для разных типов поверхности на изображении, можно построить простой пороговый алгоритм разделения

изображения на области. Примером, подтверждающим предположение, является рис. 4, где показаны гистограммы яркости каналов RGB для двух типов поверхности (поле1 и поле2), которые были искусственно выделены из исходного изображения.

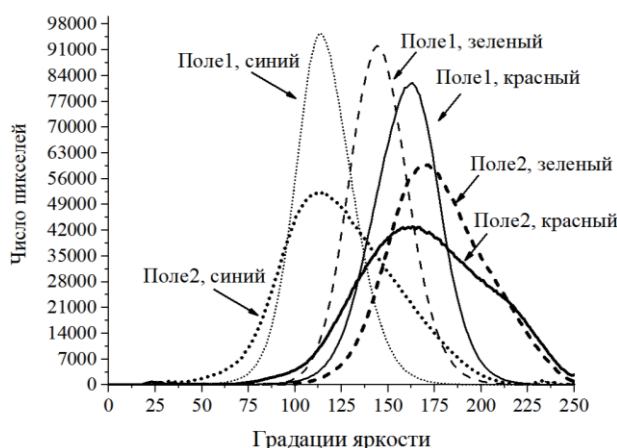


Рис. 4. Гистограммы яркости каналов RGB для двух типов поверхности (поле1 и поле2)

Анализируя рис. 4, можно отметить, что амплитуда гистограмм поля2 примерно в два раза меньше, чем для поля1. Центры синего и красного каналов достаточно близки и отличие наблюдается только для зеленого канала поля1 и поля2. Полуширины поля2 несколько больше полуширины поля1. Отсюда можно сделать вывод, что несколько признаков цветового пространства RGB являются отличительными для построения критерия кластеризации.

Такие же гистограммы были построены для цветовых пространств HSV, XYZ, LAB, LUV, YUV, HLS, а также серого изображения и нескольких индексов зелени [14, 15]. Далее для каждой гистограммы были найдены параметры формы: центр, амплитуда и полуширина на полувысоте справа и слева.

Нами проверена гипотеза о том, что гистограммы локальных участков каждого поля позволят получить статистически обусловленные параметры формы гистограмм (центр, амплитуда, полуширина

на полувысоте справа и слева), необходимые для построения порогового кластеризатора с учетом разброса параметров [16]. Выделенные изображения поле1 (рис. 5, а) и поле2 разбивались на блоки 100×100 пикселей, затем 50×50 и 25×25 пикселей (15 шт.). Для каждого блока считались статистические характеристики гистограмм, которые занесены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Средние значения параметров гистограмм для блока 100×100

Канал	Центр	Амплитуда	Ширина слева	Ширина справа
Red	162±7	195±28	12±3	11±3
Green	145±7	212±27	10±1	11±2
Blue	117±7	215±28	11±1	10±3
Gray	147±7	207±27	11±2	11±3

Таблица 2

Средние значения параметров гистограмм для блока 50×50

Канал	Центр	Амплитуда	Ширина слева	Ширина справа
Red	159±9	200±32	11±2	10±3
Green	144±7	210±28	10±2	9±2
Blue	115±7	214±28	10±2	9±2
Gray	145±7	216±27	10±2	9±2

Сравнивая результаты табл. 1 и 2, можно отметить, что параметры блоков различаются незначительно, что и следовало ожидать. Однако для разрабатываемой методики важно это знать, чтобы выбрать оптимальный размер блока, при котором происходит наилучшее выделение участка того или иного поля из исходного изображения (см. рис. 2).

Далее нами был составлен пороговый алгоритм сравнения параметров гистограммы шаблона (например, табл. 1 или 2) и текущего блока изображения того же размера. Считается совпадающим тот блок, параметры которого попадают в интервал значений (среднее ± дисперсия). Результаты работы такого простого алгоритма приведены на рис. 5.

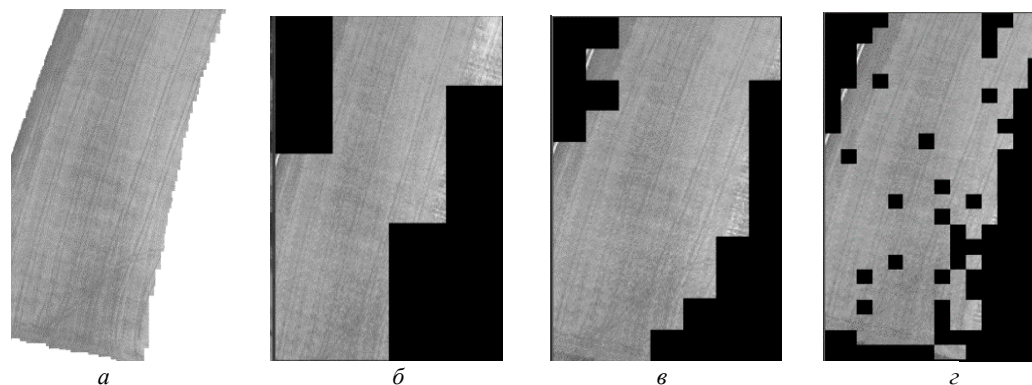


Рис. 5. Кластеризация поля1 для разного размера блоков: а – исходное изображение; б – восстановленное для блоков 100×100; в – 50×50 и г – 25×25 пикселей

На рис. 5, а показана область поля1, на рис. 5, б–г – результаты кластеризации для случая поле1 или вы-

деления на обрабатываемом изображении области, параметры гистограмм различных по размеру бло-

ков которых близки к параметрам шаблонов (заранее рассчитанным). Видно, что для случая размера блоков 100×100 и 25×25 пикселей наблюдается неудачная кластеризация и лучший вариант представлен на рис. 5, в. Показанный на рис. 5, б–г результат определяется размером интервала, определяемого дисперсией разброса параметров (показано в табл. 1 и 2), что в данном случае приводит к неточности кластеризации.

Оценка точности

Пусть у нас есть два набора изображений, один из которых $B1$ является шаблоном, т.е. с известными характеристиками $\{B1(1), B1(2), \dots, B1(N)\}$, $i = 1, N$, и $B2$ набор $\{B2(1), B2(2), \dots, B2(N)\}$, $i = 1, N$, который получается после решения задачи кластеризации. Количество истинных положительных срабатываний TP алгоритма кластеризации состоит из пар изображений (i, j) , которые правильно оказались сгруппированными в один кластер, и тогда $TP = |(i, j)|$, где $B1(i) = B1(j)$ и $B2(i) = B2(j)$. Количество ложных срабатываний FP состоит из пар (i, j) , для которых выполнена неверная группировка в одном кластере, тогда $FP = |(i, j)|$, где $B1(i) = B1(j)$ и $B2(i) \neq B2(j)$. Количество положительных срабатываний при явно отрицательных исходах TN состоит из пар характеристик, которые попали в один кластер при необходимости быть в разных кластерах. Тогда число таких срабатываний определяется $TN = |(i, j)|$, где $B1(i) \neq B1(j)$ и $B2(i) \neq B2(j)$. Количество неверных отрицательных срабатываний FN состоит из пар характеристик, которые попали в разные кластеры, что определяется $FN = |(i, j)|$, где $B1(i) \neq B1(j)$ и $B2(i) = B2(j)$. Учитывая определенные выше срабатывания алгоритма, можно построить попарную точность P правильно записанных в один кластер характеристик:

$$P = TP / (TP + FP). \quad (1)$$

Полнота R представляет собой долю пар, которые верно отнесены к одному кластеру:

$$R = TP / (TN + FP). \quad (2)$$

На основе величин P и R вычисляется F -мера в виде [17]

$$F = 2 / ((1/P) + (1/R)). \quad (3)$$

В табл. 3 представлены результаты оценки значений показателей точности для результата, показанного на рис. 5. Видно, что качественно результаты рис. 5, б–г и табл. 3 совпадают и наихудший вариант представлен рис. 5, г, а наилучший – рис. 5, в.

Таблица 3

Значения оценки показателей точности

Показатель точности	Результат, %		
	Рис. 5, б	Рис. 5, в	Рис. 5, г
Точность P	91	98	93
Полнота R	85	92	42
F -мера	88	95	58

Заключение

В статье описана значимость дистанционного зондирования Земли. Обосновано применение технологии БПЛА в умном земледелии и рассмотрена

схема измерений с помощью БПЛА. Также описана проблема кластеризации и предложена методика кластеризации, основанная на получении гистограмм цветовых пространств и получения характеристик пиков. Проверена гипотеза о том, что гистограммы локальных участков каждого поля позволят получить статистически обусловленные параметры формы гистограмм, необходимые для построения порогового кластеризатора с учетом разброса параметров. Показаны результаты кластеризации и оценки значений показателей точности.

Литература

1. Расширенная коллегия Министерства сельского хозяйства [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://government.ru/news/27097>, свободный (дата обращения: 10.05.2021).
2. Правительство России [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://government.ru/docs/all/133736/?page=2>, свободный (дата обращения: 11.05.2021).
3. Прогноз научно-технологического развития агропромышленного комплекса Российской Федерации на период до 2030 года / Минсельхоз России; Нац. исслед. ун-т «Высшая школа экономики». – М.: НИУ ВШЭ, 2017. – 140 с.
4. Точное земледелие, применение БПЛА в сельском хозяйстве, получение вегетационного индекса NDVI [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.geosalut.ru/bpla/sel-skoe-hozyajstvo/bpla-v-sel-skom-hozyajstve>, свободный (дата обращения: 10.05.2021).
5. Zhang C. The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: a review / C. Zhang, J.M. Kovacs // Precision Agric. – 2012. – No. 13. – P. 693–712.
6. Unmanned aerial vehicles in agriculture: A review of perspective of platform, control, and applications / J. Kim, S. Kim, C. Ju, H.I. Son // IEEE Access. – 2019. – Vol. 7. – P. 100–115.
7. Исаев В.В. Прогноз и картографирование сорняков. – М.: Агропромиздат, 1990. – 192 с.
8. Полин В.Д. Использование оптических датчиков «GREENSEEKER» при применении гербицида / В.Д. Полин, Е.В. Березовский, Н.В. Ларина // Доклады ТСХА. – 2010. – Вып. 282, ч. 1. – С. 310–313.
9. Афанасьев Р.А. Агрохимическое обеспечение точного земледелия // Проблемы агрохимии. – 2008. – № 3. – С. 46–53.
10. Watts A.C. Unmanned aircraft systems in remote sensing and scientific research: Classification and considerations of use / A.C. Watts, V.G. Ambrosia, E.A. Hinkley // Remote Sensing. – 2012. – Vol. 4. – P. 1671–1692.
11. Meyer G.E. Verification of color vegetation indices for automated crop imaging applications / G.E. Meyer, J.C. Neto // Comput. Electron. Agric. – 2008. – No. 63. – P. 282–293.
12. Kataev M.Yu. Illumination Correction of Multi-Time RGB Images Obtained with an Unmanned Aerial Vehicle / M.Yu. Kataev, M.M. Dadonova, D.S. Efremenko // Light & Engineering. – 2021. – Vol. 29, No. 2. – P. 50–58.
13. Xu R. Survey of clustering algorithms / R. Xu, D. Wunsch // IEEE Transactions, Neural Networks. – 2005. – Vol. 16, No. 3. – P. 645–678.
14. Yuan J. Remote sensing image segmentation by combining spectral and texture features / J. Yuan, D.L. Wang, R. Li // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2014. – Vol. 52, No. 1. – P. 16–24.
15. Катаев М.Ю. Методы технического зрения для картирования состояния сельскохозяйственных полей /

М.Ю. Катаев, К.С. Ёлгин, И.Б. Сорокин // Доклады ТУСУР. – 2018. – Т. 21, № 4. – С. 75–80.

16. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений. Москва / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М.: Техносфера, 2006. – 1072 с.

17. Choi S.S. A survey of binary similarity and distance measures / S.S. Choi, S.H. Cha, C.C. Tappert // Journal of Systemics, Cybernetics and Informatics. – 2010. – Vol. 8(1). – P. 43–48.

Катаев Михаил Юрьевич

Д-р техн. наук, проф. каф. автоматизированных систем управления (АСУ), науч. рук. Центра космического мониторинга Земли из космоса, Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: (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

Кузнецов Александр Андреевич

Магистрант ТУСУРА
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: (382-2) 70-15-36
Эл. почта: alex_monster15@mail.ru

Kataev M.Yu., Kartashov E.Yu., Kuznetsov A.A.

Technique for clustering agricultural fields based on RGB-images shot by unmanned aerial vehicles

The Earth remote sensing (ERS) technologies, that are being developed on the basis of satellite sensing and, more recently, unmanned aerial vehicles (UAVs), provide a significant potential for smart (precision) farming applications. Sensors (for example, digital RGB cameras) provide real-time data about the environment of the study area in the form of images. The sensors installed on unmanned aerial vehicles can be used in various applications related to assessing the quality of plowing, winter wheat seedlings, growing crops, etc. It becomes possible because they capture large areas with a set of images with a low time (several hours per 1000 hectares), but with a high spatial resolution (several centimeters). The remote sensing technology is expected to revolutionize the agriculture by enabling faster decision-making limited by few days only, as well as reducing costs and increasing yields. Despite the significant development, one of the areas of use of UAVs in smart agriculture is not yet as reliable and accurate as expected, mainly due to problems arising in the collection, processing and analysis of images. The main problem is that there is still no standardized workflow that includes the steps from collection to visualization of results when using UAVs in agricultural applications. One of the weak points of many image processing technologies is the insufficient quality of cluster-

ing, where each cluster found is associated with a certain type of surface. This article discusses the use of images obtained using UAVs for solving the challenges of smart agriculture. A clustering technique related to the parametric representation of histograms of brightness of color spaces and Greenness Indexes is discussed. The results of image processing are presented.

Keywords: remote sensing, unmanned aerial vehicle, image processing, smart farming.

doi: 10.21293/1818-0442-2021-24-3-50-56

References

1. Extended Collegium of the Ministry of Agriculture. Available at: <http://government.ru/news/27097>, free (Accessed: June 05, 2021) (in Russ.).

2. The Government of Russia. Available at: <http://government.ru/docs/all/133736/?page=2>, free (Accessed: June 05, 2021) (in Russ.).

3. Forecast of scientific and technological development of the agro-industrial complex of the Russian Federation for the period up to 2030 / Ministry of Agriculture of Russia; National Research University Higher School of Economics. Moscow, NRU HSE, 2017, 140 p. (in Russ.).

4. Precision farming, the use of UAVs in agriculture, obtaining the vegetation index NDVI. Available at: <http://www.geosalut.ru/bpla/sel-skoe-hozyajstvo/bpla-v-sel-skom-hozyajstve>, free (Accessed: June 05, 2021) (in Russ.).

5. Zhang C., Kovacs J.M. The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: a review. *Precision Agriculture*, 2012, no. 13, pp. 693–712.

6. Kim J., Kim S., Ju C., Son H. I. Unmanned aerial vehicles in agriculture: A review of perspective of platform, control, and applications. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 100–115.

7. Isaev V.V. *Weed forecasting and mapping*. Moscow, Agropromizdat, 1990, 192 p. (in Russ.).

8. Polin V.D., Berezovsky E.V., Larina N.V. The use of optical sensors «GREENSEEKER» when applying the herbicide. *Reports of the TSKhA*, 2010, vol. 282, part 1, pp. 310–313 (in Russ.).

9. Afanasyev R.A. Agrochemical support of precision farming. *Problems of Agrochemistry*, 2008, No. 3, pp. 46–53. (in Russ.).

10. Watts A.C., Ambrosia V.G., Hinkley E.A. *Unmanned aircraft systems in remote sensing and scientific research: Classification and considerations of use*. Remote Sensing, 2012, vol. 4, pp. 1671–1692.

11. Meyer G.E., Neto J.C. *Verification of color vegetation indices for automated crop imaging applications*. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, no. 63, pp. 282–293.

12. Kataev M.Yu., Dadonova M.M., Efremento D.S. *Il-lumination Correction of Multi-Time RGB Images Obtained with an Unmanned Aerial Vehicle*. Light & Engineering, 2021, vol. 29, no. 2, pp. 50–58.

13. Xu R., Wunsch D. Survey of clustering algorithms. *IEEE Transactions Neural Networks*, 2005, vol. 16, no. 3, pp. 645–678.

14. Yuan J., Wang D.L., Li R. Remote sensing image segmentation by combining spectral and texture features. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, vol. 52, no. 1, pp. 16–24.

15. Kataev M.Yu., Yolgin K.S., Sorokin I.B. Methods of technical vision for mapping the state of agricultural fields. *Proceedings of TUSUR University*, 2018, vol. 21, no. 4, pp. 75–80 (in Russ.).

16. Gonzalez R., Woods R. *Digital Image Processing*. Moscow, Technosphere, 2006, 1072 p.

17. Choi S.S., Cha S.H., Tappert C.C. A survey of binary similarity and distance measures. *Journal of Systemics, Cybernetics and Informatics*, 2010, vol. 8(1), pp. 43–48.

Mikhail Yu. Kataev

Doctor of Science in Engineering, Professor
Department of Automated Control Systems (ACS),
Scientific Director of the Center for Space Monitoring
of the Earth from Space, 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 Science in Engineering, Associate Professor
Department of Machines and Devices of Chemical
and Nuclear Production, Seversk Technological Institute
of the 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

Aleksander A. Kuznetsov

Master Student TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 70-15-36
Email: alex_monster15@mail.ru

УДК 004.056.2

М.Е. Коллар

Цифровое маркирование аудиосигналов, основанное на модуляции MCLT-коэффициентов

Методы сокрытия данных в аудиосигналах имеют различные приложения, такие как цифровое маркирование и стеганография. Производится краткое описание нового разработанного метода цифрового маркирования аудиосигналов, который основывается на модулированном комплексном перекрывающем преобразовании, MCLT-преобразовании. Особенность данного алгоритма маркирования – сохранение качества звучания маркированных сигналов. Исследуются зависимости между изменяемыми параметрами метода и качеством звучания аудиосигнала, а также поведение встроенного в сигнал маркера при проведении атак на аудиосигнал. На основании проведенных экспериментов делается вывод о возможности использования разработанного метода цифрового маркирования для подтверждения аутентичности звуковых файлов, распространяемых в сети Интернет или подтверждения целостности передаваемых аудиофайлов.

Ключевые слова: сокрытие данных в аудиосигналах, цифровое маркирование, целостность, аутентичность, MCLT-преобразование.

doi: 10.21293/1818-0442-2021-24-3-57-61

Применение аудиостеганографии имеет широкие возможности использования в аудиоиндустрии, криминалистике, защите данных. В статье описывается разработанный метод маркирования? способный сохранять качество звучания аудиосигнала после внедрения данных. Разработанный метод будет использоваться для подтверждения целостности маркированных аудиофайлов. В связи с этим встраиваемый маркер должен легко разрушаться при негативных воздействиях.

На данный момент существует множество вариантов маркирования и преобразования аудиосигналов. Чтобы выявить наиболее подходящую основу для разработанного метода, проведен анализ существующих методов маркирования.

Анализ существующих методов

Метод сокрытия информации в наименьших значащих битах широко применяется для внедрения цифровых маркеров в несжатые аудиосигналы. Основное достоинство данного метода заключается в возможности внедрить большой объем информации в небольшой аудиосигнал [1]. К недостаткам относятся невысокая скрытность внедренного маркера и широкая известность применяемого алгоритма маркирования.

Преимущество метода, основанного на изменении амплитуды, скорости затухания и сдвига аудиосигнала, заключается в высокой скрытности внедряемого маркера и сохранении качества звучания. Недостатками являются малый объем встраиваемых данных, битов маркера и высокие вычислительные затраты [2].

Метод внедрения данных в фазу сигнала признан наиболее подходящим для дальнейшего исследования [3]. Это связано с тем, что он обладает высокой скрытностью и позволяет сохранить качество аудиосигнала при маркировании. Также данный метод маркирования более устойчив к влиянию случайных воздействий на аудиосигнал. Недостаток данного метода – возможное появление эха в марки-

рованном аудиосигнале – может быть устранен при использовании подходящего преобразования аудиосигнала.

Разработанный алгоритм цифрового маркирования аудиосигналов, не искажающий качества звучания, пригодный для подтверждения целостности аудиосигналов, основан на модулированном комплексном перекрывающем преобразовании, далее – MCLT-преобразовании [4–6].

MCLT – обратимое преобразование с перекрытием. С его помощью возможно осуществить быстрое преобразование данных из цифровой формы в комплексную, с которой удобно работать при фазовой модуляции, а также легко их восстановить без потери качества и затирания внедренной информации. Еще одним достоинством MCLT-преобразования является его нераспространенность, что позволило разработать новый метод маркирования.

Ранее уже производились попытки использования MCLT-преобразования для маркирования аудиосигналов. Так, замена только фазы MCLT-коэффициентов – комплексных чисел [7] приводит к появлению эха в маркированном сигнале. Когда используется метод маркирования с изменяемой силой встраивания [4, 8, 9], тогда при увеличении силы встраивания количество верно извлеченных из сигнала символов маркера увеличивается, но качество сигнала становится неприемлемым.

Методы встраивания и извлечения данных

Разработанный метод цифрового маркирования – доработанная версия метода [4], который является результатом слияния алгоритмов изменения фазы MCLT-коэффициентов [6] и внедрения данных с определенной силой встраивания [8]. Его особенность – внедрение данных в фазовую и амплитудную составляющие MCLT-коэффициентов с определенной силой встраивания. Так, изменению подвергаются мнимая, и действительная части выбранного для встраивания MCLT-коэффициента (1)–(3). Для извлечения данных принятый звуковой сигнал под-

вергается прямому MCLT-преобразованию. Принятие решения относительно встроенной единицы или нуля основывается на формуле (4).

$$\operatorname{Re}(C'(i, j)) = \begin{cases} \frac{\operatorname{Re}(C(i, j))}{S} S + S \frac{3}{4}, & \text{встраивается 1;} \\ \frac{\operatorname{Re}(C(i, j))}{S} S + \frac{S}{4}, & \text{встраивается 0.} \end{cases} \quad (1)$$

$$\operatorname{Im}(C'(i, j)) = \begin{cases} \frac{\operatorname{Im}(C(i, j))}{S} S + S \frac{3}{4}, & \text{при встраивании 1;} \\ \frac{\operatorname{Im}(C(i, j))}{S} S + \frac{S}{4}, & \text{при встраивании 0.} \end{cases} \quad (2)$$

$$C'(i, j) = \operatorname{Re}(C'(i, j)) + \operatorname{Im}(C'(i, j))I. \quad (3)$$

$$Z_i = \begin{cases} \left\lfloor 1, \operatorname{Re}(C''(i, j)) - \left\lfloor \frac{\operatorname{Re}(C''(i, j))}{S} \right\rfloor S + \right. \\ \left. + \operatorname{Im}(C''(i, j)) - \left\lfloor \frac{\operatorname{Im}(C''(i, j))}{S} \right\rfloor S \right\rfloor \geq S; \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases} \quad (4)$$

где $C(i, j)$ – MCLT-коэффициент; $C'(i, j)$ – коэффициент после внедрения данных; $\operatorname{Re}(C(i, j))$ – действительная часть коэффициента; $\operatorname{Im}(C(i, j))$ – мнимая часть коэффициента; S – сила встраивания; I – мнимая единица; $\lfloor \]$ – взятие наибольшего целого, меньшего или равного данному вещественному числу (оператор «пол»); Z_i – извлекаемый бит; $C''(i, j)$ – MCLT-коэффициент, полученный после прямого преобразования при извлечении данных.

Исследование изменяемых параметров встраивания

В предложенном методе встраивания данных существуют параметры, изменение которых ведет к получению различных характеристик маркированного сигнала. Данные параметры: исходный сигнал, длина MCLT-фрейма, сила встраивания, шаг встраивания. Для верного извлечения встроенного маркера должны быть известны длина MCLT-фрейма, сила встраивания и шаг встраивания.

Проведены эксперименты по внедрению двоичной последовательности в звуковые сигналы, относящиеся к разным музыкальным жанрам: рок, классика и поп. При этом изменялись перечисленные выше параметры. Длина MCLT-фрейма в серии опытов была равна четырем. Результаты экспериментов приведены в сводной табл. 1.

По результатам установлено, что при длине MCLT-фрейма, равной четырем, доля верно извлеченных символов близка к 100%. Также выявлена зависимость между шагом встраивания процентом верно извлеченных символов и отношением сигнал/шум при силе встраивания равной одному. Так, чем больше шаг встраивания, тем меньше данных внедряется в сигнал, тем больше отношение сигнал/шум и, соответственно, лучше качество звучания сигнала.

Проверка помехоустойчивости встроенного маркера

Проверка стойкости встраиваемого маркера необходима, чтобы установить, пригоден ли разработанный метод цифрового маркирования для подтверждения целостности аудиосигналов. Требуется, чтобы при малейшем изменении аудиосигнала маркер разрушался. Для проверки данного свойства маркера смоделированы атаки на маркированные аудиосигналы.

Предполагается, что цель злоумышленника – удаление или изменение внедренного маркера [1, 10–12] без ухудшения качества маркированного аудиосигнала. Поэтому требуется определить параметры атак аудиосигналов, при которых качество исходного сигнала не ухудшается. Изменениям будут подвержены также эталонные, немаркированные сигналы. Таким образом, будут установлены такие параметры атаки, при которых факт произведенной атаки нельзя установить без специальной проверки. Качество звучания проверяется субъективно, а также аналитически с помощью расчета параметра сигнал/шум.

В идеальных условиях, когда маркированный аудиосигнал не подвергается негативным влияниям, удастся верно извлечь 95–100% внедренного маркера. Если же доля совпадения внедренной и извлеченной двоичной последовательности составляет менее 70%, считается, что аутентичность сигнала не доказана.

Для проведения проверок выбраны следующие типы атак [12–14]:

- зашумление сигнала – воздействие на сигнал аддитивного белого Гауссовского шума. Реализуется путем прибавления к информационному сигналу случайной компоненты [15];
- фильтрация сигнала осуществляется с помощью использования фильтра нижних частот Баттерворта, реализованного в MatLabе.
- реверберация аудиосигнала – постепенное уменьшение интенсивности звука при его многократных отражениях [16].

Подготовка исходных данных

К исходным данным относятся исходный маркер, три эталонных аудиосигнала разных жанров музыки, 30 маркированных файлов, по 10 файлов каждого жанра. Аудиосигналы маркируются с разными шагами встраивания от 50 до 500.

Характеристики исходных маркированных сигналов представлены в сводной табл. 1. К ним относятся качество звучания аудиосигнала (отношение сигнал/шум), процент верно извлеченных символов двоичной последовательности. В таблице отображается зависимость данных характеристик от шага встраивания маркера. Качество маркированных аудиофайлов определялось на слух и было признано удовлетворительным.

Выбор параметров атак.

Атака эталонных аудиосигналов

Для выбора параметров осуществляются атаки на эталонные сигналы. Критерии выбора параметров атаки – приемлемое аналитическое и субъективное качество звучания аудиосигнала. Качество

аудиосигнала считается приемлемым, если отношение сигнал/шум больше или равно 30. При проведении данного этапа исследования три эталонных звуковых файла с музыкальными композициями разных жанров подвергаются негативным воздействиям. После атаки с использованием различных параметров измеряется качество звучания сигнала. Результаты атак эталонных сигналов приведены в сводной табл. 2.

– Зашумление аудиосигнала.

С увеличением параметра шума происходит незначительное снижение отношения сигнал/шум. Однако при проведении субъективной оценки слышимости атака заметна.

– Фильтрация аудиосигнала.

Качество звучания аудиосигнала при фильтрации для выбранных параметров признано приемлемым при проведении субъективного и аналитического анализа.

– Реверберация аудиосигнала.

При уменьшении значения изменяемого параметра не происходит значительного изменения сигнала, при увеличении появляется эхо, слышимое без использования специальной аппаратуры. Несмотря на то, что отношение сигнал/шум имеет невысокие значения, субъективно воздействие атаки на сигнал не заметно.

Таблица 1

Характеристики исходного маркированного аудиосигнала. Зависимость между шагом встраивания и качеством звучания

Шаг	Встроенно бит	Классика			Рок			Поп		
		Сигнал/шум	Извлечено бит	%	Сигнал/шум	Извлечено бит	%	Сигнал/шум	Извлечено бит	%
50	1024	19,7	1011	98,7	12,5	981	95,8	23,2	1012	98,8
100	512	22,9	507	99,0	15,4	499	97,5	26,1	507	99,0
150	341	24,55	335	98,2	17,1	325	95,3	28,1	339	99,4
200	256	25,7	253	98,8	18,4	248	96,9	28,6	255	99,6
250	205	26,6	203	99,0	19,2	198	96,6	30,2	204	99,5
300	170	27,3	168	98,8	19,9	160	94,1	30,7	168	98,8
350	146	27,9	145	99,3	20,6	140	95,9	31,6	143	97,9
400	128	28,3	127	99,2	21,4	124	96,9	31,9	127	99,2
450	114	28,8	113	99,1	21,9	108	94,7	32,5	114	100
500	102	29,2	101	99,0	22,3	100	98,0	32,7	102	100

Таблица 2

Зависимость качества звучания эталонного сигнала при его зашумлении, фильтрации и реверберации

Параметр шума	Зашумление аудиосигнала			Фильтрация аудиосигнала			Реверберация аудиосигнала				
	Отношение сигнал/шум			Параметр фильтра	Отношение сигнал/шум			Параметр реверб.	Отношение сигнал/шум		
	Классика	Поп	Рок		Классика	Поп	Рок		Классика	Поп	Рок
1×10^{-5}	36,9	40,4	31,1	0,05	6,4	4,9	3,24	0,01	9,5	8,4	5,7
2×10^{-5}	33,9	37,4	28,2	0,1	10,9	7,7	5,21	0,02	9,5	9,4	5,3
3×10^{-5}	32,1	35,6	26,4	0,2	16,3	11,5	8,21	0,04	10,1	9,4	5,3
4×10^{-5}	30,9	34,4	25,1	0,3	20,1	14,3	10,62	0,06	10,2	9,4	6,2
5×10^{-5}	29,9	33,4	24,3	0,4	23,1	16,6	12,79	0,08	10,2	9,2	5,6
6×10^{-5}	29,1	32,6	23,2	0,5	25,8	18,8	14,96	0,1	10,3	9,3	5,6
7×10^{-5}	28,5	31,9	22,5	0,6	28,5	21,2	17,29				
8×10^{-5}	27,9	31,4	21,9	0,7	31,6	23,9	20,06				
9×10^{-5}	27,4	30,1	21,4	0,8	35,5	27,7	23,74				
1×10^{-4}	26,9	30,4	21,1	0,9	41,7	33,7	29,84				

Таблица 3

Процент верно извлеченных символов маркера при проведении атак зашумления сигнала, фильтрации сигнала и реверберации сигнала

Параметр Шума	Зашумление аудиосигнала			Фильтрация аудиосигнала			Реверберация аудиосигнала				
	%			Параметр фильтра	%			Параметр реверб.	%		
	Классика	Поп	Рок		Классика	Поп	Рок		Классика	Поп	Рок
1×10^{-5}	22,4	22,5	23,3	0,05	23,9	22,7	23,4	0,01	24,5	23,8	24,5
2×10^{-5}	22,9	22,9	24,4	0,1	21,4	22,3	23,7	0,02	23,4	24,9	24,9
3×10^{-5}	22,6	22,4	24,2	0,2	23,3	23,8	25,9	0,04	22,8	24,9	24,9
4×10^{-5}	24,6	24,9	25,9	0,3	22,6	25,7	25,8	0,06	22,7	23,1	23,1
5×10^{-5}	25,3	25,3	26,1	0,4	23,1	22,8	26,9	0,08	22,6	25,8	25,8
6×10^{-5}	25,9	25,9	23,7	0,5	21,1	23,7	25,8	0,1	22,5	23,8	23,1
7×10^{-5}	28,6	28,9	21,5	0,6	24,5	25,6	24,8				
8×10^{-5}	27,5	27,8	31,8	0,7	23,9	25,8	27,9				
9×10^{-5}	20,1	20,2	23,6	0,8	21,7	19,7	24,1				
1×10^{-4}	22,5	22,5	19,9	0,9	19,4	28,3	22,6				

Атаки маркированных аудиосигналов

Далее атакам подвергаются исходные маркированные аудиосигналы, при этом использовались параметры атак, представленные в сводной табл. 2. Результаты исследования представлены в сводной табл. 3, при этом перечислены средние значения процентов верно извлеченных маркеров при указанных параметрах атак.

Из полученных результатов видно, что встраиваемый в аудиосигналы маркер теряет свою целостность под воздействием атак. Так, при осуществлении негативных воздействий указанными ранее способами верно удалось извлечь не более 35% от внедренного маркера. Данная закономерность выявлена для всех используемых типов атак.

Заключение

В рамках данной работы разработан метод цифрового маркирования, основанный на MCLT-преобразовании. Алгоритм позволяет маркировать аудиосигналы без ухудшения качества их звучания.

В ходе проведения исследований выявлены параметры, при которых достигаются высокое качество звучания аудиосигнала, измеренное с помощью отношения сигнал/шум, и наибольшая доля верно извлеченных символов маркера.

На основании проведенных исследований установлено, что маркер является «хрупким». Это свидетельствует о том, что целостность маркированных аудиофайлов нарушается при изменениях аудиосигнала. В связи с этим разработанный алгоритм может применяться для подтверждения подлинности передаваемых аудиофайлов.

Литература

1. Гофман М.В. Методика цифрового маркирования аудиосигналов для скрытой акустической связи через воздушный аудиоканал / М.В. Гофман, А.А. Корниенко, Е.Т. Мирончиков // Известия СПб. ун-та путей сообщения. – 2018. – Т. 15, № 2. – С. 280–294.
2. Тутубалин П.И. Вероятностные модели обеспечения информационной безопасности автоматизированных систем обработки информации и управления / П.И. Тутубалин, В.С. Моисеев. – Казань: Школа, 2008. – 151 с.
3. Грибунин В.Г. Цифровая стеганография: учеб. пособие / В.Г. Грибунин, И.Н. Оков, И.В. Туринцев. – М.: Солон-пресс, 2020. – 263 с.
4. Литвинцева М.Е. Методы встраивания информации в аудиосигнал путем фазовой модуляции MCLT-коэффициентов / М.Е. Литвинцева, М.В. Гофман // Транспорт: проблемы, идеи, перспективы: сб. тр. LXXXIX Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – СПб.: ПГУПС, 2019. – С. 200–203.
5. Гофман М.В. Скрытая передача данных через воздушный аудиоканал маркированными аудиосигналами / М.В. Гофман, А.А. Корниенко // Сб. науч. статей VIII Междунар. науч.-техн. и науч.-метод. конф. «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО–2019)». – СПб.: СПбГУТ, 2019. – С. 361–365.
6. Malvar H. Modulated Complex Lapped Transform and its Applications to Audio Processing // IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. – Phoenix: IEEE, 1999. – Vol. 1. – P. 1421–1424.
7. Kiho C. Robust Data Hiding for MCLT Based Acoustic Data Transmission / C. Kiho, S.Y. Hwan, S.K. Nam // IEEE

Signal Processing Letters. – 2010. – Vol. 17, No. 7 – P. 715–718.

8. Efficiently Self-Synchronized Audio Watermarking for Assured Audio Data Transmission / W. Shaoquan, H. Jiwu, H. Daren, Q.S. Yun // IEEE Transactions on Broadcasting. – 2005. – Vol. 51, No. 1. – P. 69–76.

9. Гофман М.В. Метод трехэтапной скрытой передачи информации маркированными цифровыми аудиосигналами / М.В. Гофман, А.А. Корниенко // Информационная безопасность регионов России (ИБРР–2019). XI СПб. межрег. конф. – СПб.: СПОИСУ, 2019. – С. 312–313.

10. Detection of audio covert channels using statistical footprints of hidden messages / H. Ozer, I. Avcıba, B. Sankur, N. Memon // Digital Signal Processing. – 2016. – Vol. 16, No. 4. – P. 389–401.

11. Steganalysis of audio based on audio quality metrics / H. Ozer, I. Avcıba, B. Sankur, N. Memon // Proceedings of the Conference on Security, Steganography and Watermarking of Multimedia, Contents V. – Hong Kong: MECS Press, 2003. – Vol. 5020. – P. 55–66.

12. Multi-Level Reversible Data Anonymization via Compressive Sensing and Data Hiding / M. Yamac, N. Passalis, M. Ahishali, J. Raitoharju // IEEE Transactions on Information Forensics and Security. – 2021. – Vol. 16. – P. 1014–1028.

13. StirMark Benchmark: Audio Watermarking Attacks / M. Steinebach, F. Petitcolas, F. Raynal, J. Dittmann, C. Fontaine, S. Seibel, N. Fates // International Conference on Information Technology: Coding and Computing (ITCC). – Las Vegas: IEEE, 2001. – Vol. 1. – P. 49–54.

14. Kang H. Two-stage noise aware training using asymmetric deep denoising autoencoder / H. Kang, J. Shin, W. Hyun // IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). – 2016. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7472782> (дата обращения: 01.02.2021).

15. Yamac M. Robust Data Hiding Scheme for Compressively Sensed Signals / M. Yamac, B. Sankur, M. Gabbouj // 26th European Signal Processing Conference (EUSIPCO). – Rome: IEEE, 2018. – Vol. 1. – P. 1760–1764.

16. Гинкин Г.Г. Справочник по радиотехнике: учеб. пособие. – М. – Л.: Гос. энерг. изд-во, 1948. – 821 с.

Коллар Мария Евгеньевна

Студентка каф. информатики и информационной безопасности Петербургского государственного университета путей сообщения Александра I Московский пр-т, 9, г. Санкт-Петербург, 190031
Тел.: +7-911-132-27-62
Эл. почта: mashuny.lit@gmail.com

Kollar M.E.

Digital audio watermarking based on the modulation of MCLT-coefficients

Audio data hiding techniques have various applications such as audio watermarking and steganography. This article provides a brief description of a new method of digital audio watermarking that has been developed based on a modulated complex lapped transform (MCLT). The new audio watermarking algorithm saves the sound quality of the marked signals. The experimental results show the dependence of the sound quality of the marked audio signal on the parameters of

the marking method. Moreover, the results of the experiments show the influence of various attacks on the marked audio signal. Based on conducted experiments, it is concluded that the new method of digital audio watermarking can be used to confirm the authenticity of audio files distributed through the Internet or to confirm the integrity of the transmitted audio files.

Keywords: audio data hiding, digital audio watermarking, integrity, authenticity, modulated complex lapped transform.

doi: 10.21293/1818-0442-2021-24-3-57-61

References

1. Gofman M.V., Kornienko A.A., Mironchinkov E.T. Methodology of digital marking of audio signals for hidden acoustic communication through an air audio channel. *Izvestiya Petersburg Transport State University*, 2018, vol. 15, no. 2, pp. 280–294 (in Russ.).
2. Tutubalin P.I., Moiseev V.S. *Veroyatnostnie modeli obespecheniya informatsionnoy bezopasnosti avtomatizirovannih sistem obrabotki informatsii i upravleniya* [Probabilistic models for ensuring information security of automated information processing and management systems]. Kazan, Shkola Publ., 2008, 151 p.
3. Gribunin V.G., Okov I.N., Turincev I.V. *Cifrovaya steganografiya* [Digital steganography]. Moscow, Solon-press Publ., 2020, 263 p.
4. Litvintseva M.E., Gofman M.V. Metodi vstraivaniy informatsii v audiosignal putyom fazovoi modulyatsii MCLT koefitsientov [Methods of embedding information in an audio signal by phase modulation of MCLT-coefficients]. *Transport: problem, idei, perspektivi*. Sbornik trudov LXXXIX Vserossiyskoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii studentov, aspirantov i molodih uchonych [Transport: problems, ideas, prospects. Proceedings of the LXXXIX All-Russian Scientific and Technical Conference of Students, postgraduates and young scientists]. St. Petersburg, PGUPS Publ., 2019, vol. 1, pp. 200–203 (in Russ.).
5. Gofman M.V., Kornienko A.A. Skritaya peredacha dannih cherez vosduhnyy audiokanal markirovannimi audiosignalami [Hidden data transmission via an aerial audio channel with labeled audio signals]. Sbornik nauchnih statey VIII Mejdunarodnoy nauchno-tehnicheskoi i nauchno-metodicheskoi konferentsii *Aktualnie problem infotelekomunikatsiy v nauke i obrazovanii (APINO 2019)* [Proc. of scientific articles of the VIII International scientific-technical and scientific-methodological conference *Actual Problems of Infotelecommunications in Science and Education (APINO 2019)*], SPb., SPbGUT Publ., 2019, vol. 1, pp. 361–365 (in Russ.).
6. Malvar H. Modulated Complex Lapped Transform and its Applications to Audio Processing. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. Phoenix, IEEE Publ., 1999, vol. 1, pp. 1421–1424.
7. Kiho C., Hwan S.Y., Nam S.K. Robust Data Hiding for MCLT Based Acoustic Data Transmission. *IEEE Signal Processing Letters*, 2010, vol. 17, no. 7, pp. 715–718.
8. Shaoquan W., Jiwu H., Daren H., Yun Q.S. Efficiently Self-Synchronized Audio Watermarking for Assured Audio Data Transmission. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 2005, vol. 51, no. 1, pp. 69–76.
9. Gofman M.V., Kornienko A.A. *Metod trehetapnoi skritoy peredachi informatsii markirovannimi cifrovimi audiosignalami* [The method of three-stage hidden transmission of information by labeled digital audio signals]. *Informatsionnaya besopasnost regionov Rossii (IBRR-2019)*. XI Sankt-Peterburgskaya mejregionalnaya konferentsiya [Information security of the regions of Russia (IBRR-2019)]. XI St. Petersburg Interregional Conference]. SPb., SPOISU Publ., 2019, vol. 1, pp. 312–313 (in Russ.).
10. Ozer H., Avci I., Sankur B., Memon N. Detection of audio covert channels using statistical footprints of hidden messages. *Digital Signal Processing*, 2016, vol. 16, no. 4, pp. 389–401.
11. Ozer H., Avci I., Sankur B., Memon N. Steganalysis of audio based on audio quality metrics. Proceedings of the Conference on *Security, Steganography and Watermarking of Multimedia, Contents V*. Hong Kong, MECS Press Publ., 2003, vol. 5020, pp. 55–66.
12. Yamac M., Passalis N., Ahishali M., Raitoharju J. Multi-Level Reversible Data Anonymization via Compressive Sensing and Data Hiding. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2021, vol. 16, pp. 1014–1028.
13. Steinebach M., Petitcolas F., Raynal F., Dittmann G., Fontaine C., Seibel S., Fates N. StirMark Benchmark: Audio Watermarking Attacks International Conference on *Information Technology: Coding and Computing (ITCC)*. Las Vegas, IEEE Publ., 2001, vol. 1, pp. 49–54.
14. Kang H., Shin J., Hyun W. Two-stage noise aware training using asymmetric deep denoising autoencoder. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 2016, available at: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7472782> (Accessed: February 01, 2021).
15. Yamac M., Sankur B., Gabbouj M. Robust Data Hiding Scheme for Compressively Sensed Signals. *26th European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*. Rome, IEEE Publ., 2018, vol. 1, pp. 1760–1764.
16. Ginkin G.G. *Spravochnik po radiotekhnike* [Handbook of Radio Engineering]. Moscow-Leningrad, Gosudarstvennoe energeticheskoe izdanie Publ., 1948, 821 p.

Mariia E. Kollar

Student, Department of Information Technology and IT Security, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University
9, Moskovskiy st., St. Petersburg, Russia, 190031
Phone: +7-911-132-27-62
Email: mashuny.lit@gmail.com

УДК 004.42:352

А.А. Захарова, Л.Ю. Захаров

Информационная система опережающей подготовки кадров моногорода: концепция, функции и состав модулей

Рассмотрен один из важнейших аспектов для развития моногородов в современных условиях – создание системы опережающей подготовки кадров моногорода (СОПКМ), обеспечивающей реализацию выбранной стратегии моногорода. Поставлена проблема разработки комплексной методологической базы и программной среды, в которой обеспечиваются сетевое взаимодействие учебных заведений, работодателей, администрации моногорода, населения (индивидуумов), а также поддержка процессов принятия решений в соответствии с их задачами и требованиями. Сформулированы концептуальные методологические принципы разработки программного обеспечения, основываясь на критериях и информационных потребностях субъектов СОПКМ при принятии решений. Представлены результаты функционального моделирования информационной системы опережающей подготовки кадров моногорода, состав модулей и технология их взаимодействия.

Ключевые слова: моногород, опережающая подготовка кадров, информационная система, принятие решений, функциональное моделирование, модуль.

doi: 10.21293/1818-0442-2021-24-3-62-68

Проблемы развития моногородов в РФ стоят на повестке дня органов власти всех уровней управления (государственном, региональном, муниципальном). В перечень моногородов в РФ (монопрофильных муниципальных образований) на данный момент включены 319 поселений, разделенных на три группы в зависимости от сложности социально-экономического положения: сложное, риски ухудшения и стабильное [1]. Стратегия в отношении развития моногородов может быть различной. Так, в [2] выделяют четыре альтернативы развития моногородов в зависимости от уровня и направления миграции населения, а также степени локализации производства – ликвидация, самостоятельное развитие, создание потенциала для диверсификации, искусственное поддержание моногорода.

Одной из мер поддержки стратегий диверсификации и самостоятельного развития является создание территорий опережающего социально-экономического развития (ТОСЭР, ТОР) [3], задачами которых является предоставление особых условий ведения бизнеса, льгот, создание новых и развитие существующих предприятий, внедрение современных технологий, создание инновационной продукции, экспансия сбыта продукции предприятий и др. Это несомненно требует соответствия профессионально-квалификационной структуры трудовых ресурсов моногорода потребностям рынка труда (текущим и перспективным). В то же время следует отметить, что какой бы ни была выбрана стратегия моногорода, вопрос формирования системы опережающей подготовки кадров является определяющим для решения проблем миграции населения, развития производств, создания благоприятных условий для реализации профессиональных, карьерных и личных целей индивидуумов (населения моногорода) [4].

Система опережающей подготовки кадров моногорода (СОПКМ) должна ориентироваться на цели основных субъектов рынка труда и образования: администрация моногорода, население, учебные заведения, работодатели [5]. При этом информационные потребности различных субъектов могут

быть удовлетворены только при организации сетевого взаимодействия этих субъектов при принятии решений.

В [6] приведено обоснование особенностей данного взаимодействия и требований к его информационному обеспечению.

Цель данной работы – провести функциональное моделирование информационной системы опережающей подготовки кадров моногорода (ИСОПКМ). Основные задачи: выявить информационные потребности для поддержки принятия решений субъектами СОПКМ; определить состав модулей ИСОПКМ и их функционал, технологию их взаимодействия. Полученные результаты являются основой для разработки прототипа ИСОПКМ.

Проблемы принятия решений в системе опережающей подготовки кадров моногородов

Как уже было отмечено выше, формирование и развитие СОПКМ должно осуществляться, основываясь на целях основных субъектов рынка труда и образования моногорода. Каждый из этих субъектов имеет разные требования к СОПКМ и соответственно собственные критерии при оценке соответствия СОПКМ своим целям [7]. Чаще всего проблемы принятия решений в отношении подготовки кадров рассматриваются с точки зрения соответствия потребностей рынка труда и образовательных программ [8, 9], оценки качества образовательных программ [10], формирования индивидуальных образовательных траекторий [11]. Но особенности моногорода и его развития определяют необходимость существенного расширения набора этих критериев, а соответственно и задач принятия решений. В таблице приводятся основные критерии и информационные потребности при принятии решений в сфере СОПКМ с точки зрения различных этапов принятия решений для каждого из субъектов. По сути, эти факторы и определяют необходимый функционал информационной системы опережающей подготовки кадров моногорода (ИСОПКМ) и требования к разработке математического и программного обеспечения.

Система критериев и информационных потребностей принятия решения в СОПКМ

Субъект / этап	Анализ	Оценка и выбор	Контроль
Индивидуум (население)	Перспективные отрасли и направления развития моногорода. Текущая и прогнозная востребованность и потребность в специалистах по направлениям подготовки, отраслям экономики. Количество и качество вакансий на рынке труда моногорода. Конкурентоспособность образовательных программ и их выпускников на рынке труда. Качество реализации образовательных программ. Качество жизни в моногороде. Предпочтения и представления в профессиональной карьере	Оптимальность образовательной программы с точки зрения возможности достижения целей профессиональной карьеры индивидуума (экономических, профессиональных, личностных, социальных и др.)	Достижение целей профессиональной карьеры. Востребованность на рынке труда
Работодатель	Перспективные отрасли и направления развития моногорода. Производственная программа предприятия, исходя из текущей и прогнозной рыночной ситуации, спроса и предложения на продукцию (услуги), возможностей освоения новых видов продукции (услуг) и т.д. Соответствие профессионально-квалификационной структуры персонала предприятия текущим и прогнозным потребностям	Качество подготовки и профессиональная компетентность выпускников образовательных программ учебных заведений	Количество выпускников учебных учреждений, трудоустраивающихся на предприятие. Соответствие профессиональных компетенций выпускников требованиям предприятия. Достижение целевых индикаторов системы опережающей подготовки кадров моногорода
Орган власти (муниципалитет)	Соотношение спроса и предложения профессиональных кадров на рынке труда по направлениям подготовки кадров (качество и количество). Трудоустройство выпускников образовательных программ учреждений профессионального образования на предприятиях города. Прогнозная потребность в кадрах, исходя из потребностей новых предприятий, расширения перечня отраслей экономики моногорода	Сбалансированность предложения и спроса профессиональных кадров на рынке труда (в том числе прогнозная). Оценка влияния текущего и прогнозного состояния системы опережающей подготовки кадров на изменение социально-экономического развития моногорода	Изменение структуры отраслей экономики моногорода. Достижение целевых индикаторов системы опережающей подготовки кадров моногорода. Сохранение населения моногорода
Учебное заведение	Текущая и прогнозная потребность в специалистах по направлениям подготовки. Конкурентоспособность образовательных программ учебного заведения. Удовлетворенность работодателей выпускаемыми выпускниками образовательных программ. Удовлетворенность выпускников предлагаемыми вакансиями на рынке труда города. Прогнозируемые направления (отрасли) развития моногорода в стратегической перспективе	Востребованность выпускников образовательной программы в городе (текущая и прогнозная). Критерии эффективности реализации образовательных программ	Соответствие результатов реализации образовательных программ запланированным. Достижение целевых индикаторов системы опережающей подготовки кадров моногорода

Следует отметить, что на сегодняшний день отсутствуют специальные программные средства, обеспечивающие информационную поддержку системы опережающей подготовки кадров с учетом особенностей и потребностей в принятии решений в моногороде. Наиболее близкими по сути являются программные продукты и методы, созданные для прогнозирования потребностей в кадрах на средне- и долгосрочную перспективу в разрезе отраслей, регионов и страны в целом, определения оптимальной структуры подготовки кадров по направлениям и уровням обучения, учитывая различные сценарии социально-экономического развития страны. Подоб-

ные системы создаются и в России, и за рубежом [9, 12–14]. Но их функционал и математическое обеспечение для прогнозирования нацелены на мезо- и макроуровень, а особенности социально-экономической ситуации и стратегия развития моногорода не учитываются.

Таким образом, актуальна задача создания комплексной методологической базы и программной среды, в которой обеспечивается сетевое взаимодействие учебных заведений, работодателей, администрации моногорода, населения (индивидуумов), а также осуществляется поддержка процессов принятия решений в соответствии с задачами и требованиями субъектов СОПКМ.

Концепция и состав модулей ИСОПКМ

В [6] выявлены и сформулированы концептуальные методологические принципы разработки информационного обеспечения для сетевого взаимодействия основных участников опережающей подготовки инженерно-технических и педагогических кадров моногородов – ТОР. Основные из них:

- база данных ИСОПКМ должна аккумулировать в себе разрозненную информацию о результатах и планах субъектов рынка труда и образования, это позволит повысить информированность субъектов при принятии решений, обеспечить их сетевое взаимодействие;

- ИСОПКМ реализует в себе функционал системы поддержки принятия решений, предоставляет субъектам не только агрегированную информацию о СОПКМ, но и модельный инструментарий для повышения обоснованности принимаемых решений;

- всё многообразие задач принятия решений, которое определяется особенностями субъектов сетевого взаимодействия подготовки кадров моногорода, разнообразием их целей и способов их достижения, можно разделить на типовые (свойственные каждому из субъектов СОПКМ) и специальные (определяющие потребности в принятии решений конкретного субъекта) [15];

- в силу высокой неопределенности наступления различных событий в моногороде и слабой их предсказуемости, а также необходимости учета активного влияния человека на развитие моногорода, в ИСОПКМ должны быть реализованы процессы экспертного оценивания.

Исходя из этих и других требований было осуществлено функциональное проектирование ИСОПКМ, осуществлена декомпозиция функционала по отдельным модулям ИСОПКМ. Представим описание отдельных SADT-диаграмм в нотации IDEF0 по наиболее значимым функциям ИСОПКМ.

Модель нулевого уровня характеризует основные потоки входящей и выходной информации, субъектов-пользователей ИСОПКМ в соответствии с их ролями (администратор, ЛПР, аналитик, индивидум, эксперт), а также управляющие объекты, регламентирующие структуру и принципы работы ИСОПКМ (регламент работы с ИСОПКМ, модели и методы принятия решений, онтология системы опережающей подготовки кадров и информационная модель данных, учитывающая сетевое взаимодействие субъектов СОПКМ).

На рис. 1 представлены основные компоненты ИСОПКМ, принципиально отличающиеся своим назначением.

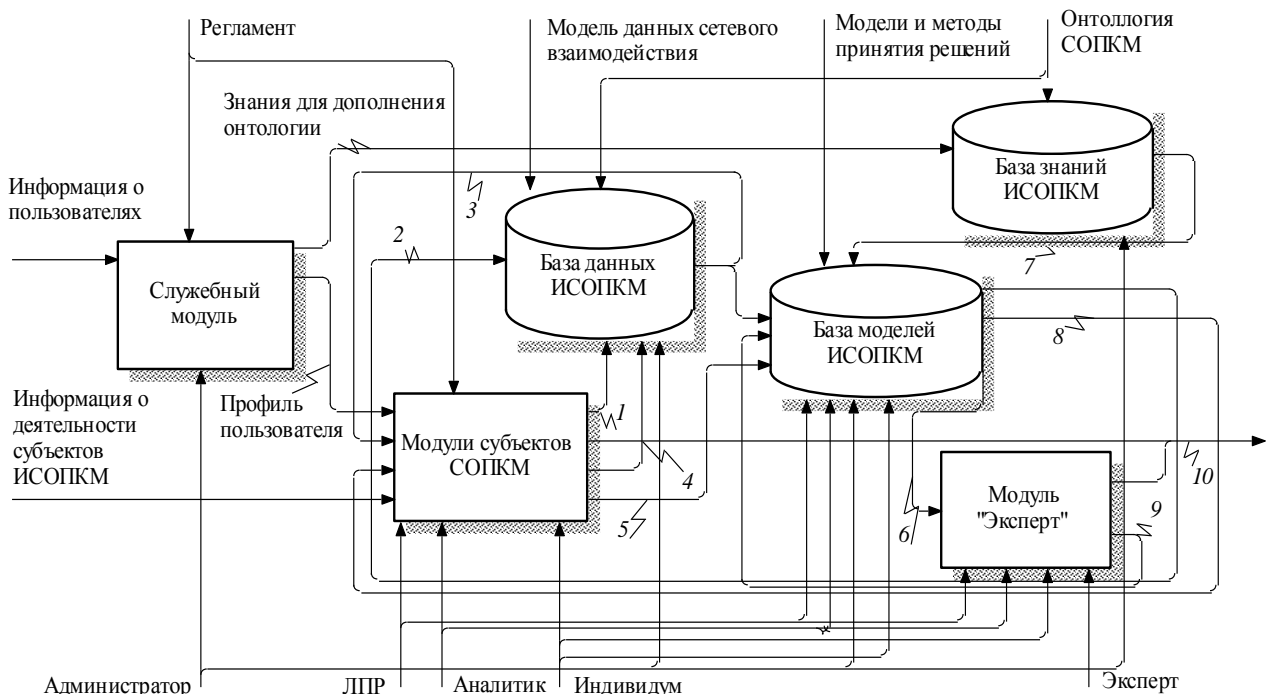


Рис. 1. Основные модули ИСОПКМ

Приведем перечень обозначений на рис. 1:

1 – запросы на информацию от субъектов СОПКМ;

2 – запросы данных для моделей принятия решений (ПР);

3 – информация из БД по запросу субъекта СОПКМ;

4 – информация о деятельности субъектов СОПКМ для учета в БД;

5 – запрос на информацию для ПР;

6 – запросы на экспертное оценивание;

7 – знания о закономерностях взаимодействия субъектов СОПКМ;

8 – расчетная информация для ПР;

9 – результаты экспертного оценивания;

10 – отчеты ИСОПКМ.

Далее представим описание модулей.

1. Служебный модуль – служит для управления личными кабинетами пользователей, настройки интерфейса и других пользовательских настроек.

2. Модули субъектов СОПКМ (работодатель, индивидуум, учебное заведение, органы власти) – предоставляют интерфейс, необходимый для работы конкретным субъектам СОПКМ, организуются по одному принципу, модули напрямую не взаимодействуют друг с другом, интеграция данных осуществляется через базу данных ИСОПКМ. Основной функционал этих модулей: внесение данных в БД, запросы к БД для получения информации о других субъектах, запросы в базу моделей для принятия решений.

3. База данных ИСОПКМ – интегрирует в себе информацию о рынках образовательных услуг и труда моногорода, получаемую от разных субъектов СОПКМ. В ходе концептуального проектирования выработан подход к созданию модели данных, который позволяет учесть особенности сетевого взаимодействия субъектов СОПКМ и при этом обеспечить полноту необходимых данных, исключить дублирование информации, обеспечить информационные потребности процессов принятия решений субъектов СОПКМ [6].

4. База моделей – содержит в себе алгоритмы, реализующие набор моделей принятия решений для разных субъектов СОПКМ, а также инструменты для управления этими моделями, конфигурирования их под задачу принятия решений. База моделей де-

композирована на модули типовых и специальных моделей принятия решений. На следующем уровне декомпозиции базы моделей для подсистемы « типовые модели выделены модели для принятия решений на отдельных этапах принятия решений (анализ, выбор и контроль), отличающихся по видам задач [15].

5. База знаний – содержит в себе знания из онтологии предметной области и позволяет осуществлять вывод знаний о закономерностях развития СОПКМ.

6. Модуль для организации экспертиз – реализует методы организации экспертиз и обработки результатов экспертных опросов.

На рис. 2 для примера представлен функционал модуля «Анализ» в подсистеме типовых моделей принятия решений.

Приведем перечень обозначений на рис. 2:

11 – нечеткая модель оценки факторов на основе парных сравнений;

12 – нечеткая модель оценки факторов на основе статистических данных;

13 – нечеткая модель оценки факторов на основе гауссовских функций;

14 – нечеткая продукционная модель оценки значимости возможностей/угроз;

15 – нечеткий логический вывод;

16 – нечеткие продукционные модели установления и оценивания взаимосвязи факторов;

17 – нечеткие оценки факторов;

18 – нечеткие оценки возможностей/угроз.

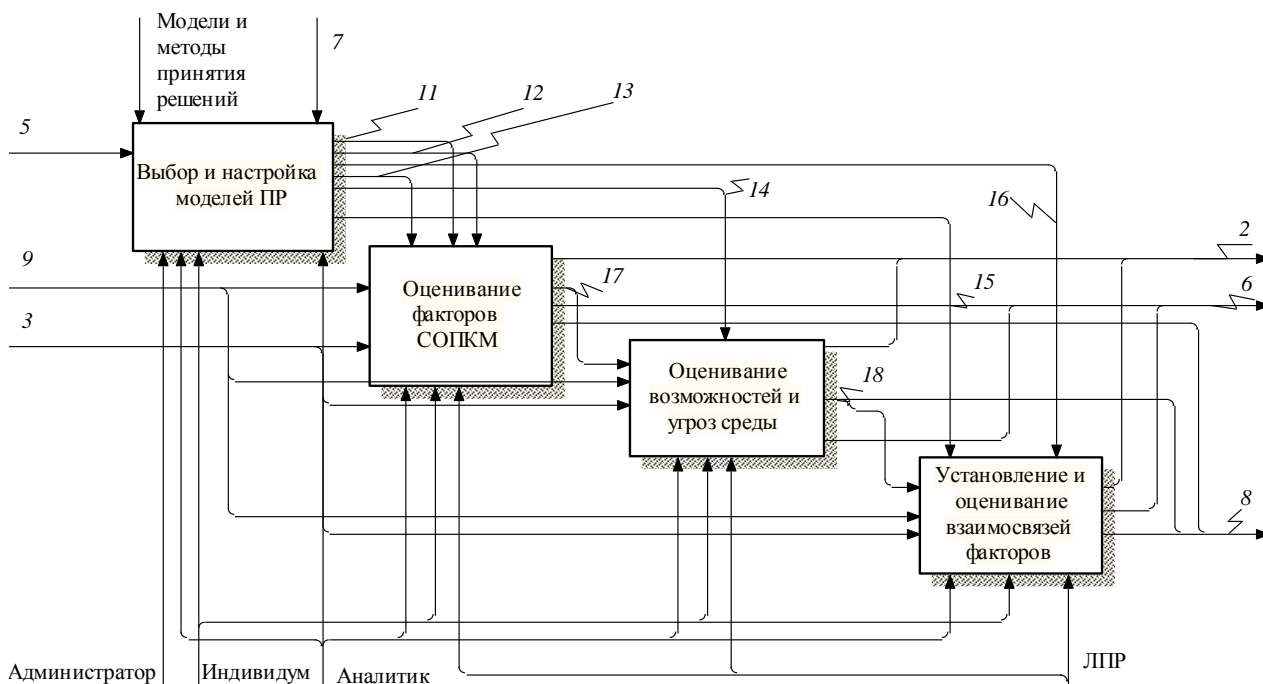


Рис. 2. Функционал модуля «Анализ» в подсистеме типовых моделей принятия решений

По поступившему запросу на принятие решений ЛПР или аналитик осуществляет выбор модели, настройку ее под свои запросы, при необходимости осуществляет запросы на экспертизу, в результате получает расчетную информацию для принятия ре-

шений. В качестве математического обеспечения этого модуля используются типовые модели принятия решений, основанные на нечетких множествах и правилах продукций.

На основе полученных результатов были разработаны прототипы отдельных модулей подсистем ИСОПКМ, реализующих формы для работы с базой данных, типовые модели принятия решений в условиях неопределенности, экспертное оценивание. Разработка прототипов осуществлена на технологической платформе 1С: Предприятие 8.3.

Апробация программного обеспечения осуществлялась на примере моногорода Юрга (Кемеровская область), который в соответствии с [1] отнесен к моногородам с наиболее сложным социально-экономическим положением (в связи с проблемами функционирования градообразующих организаций). Город Юрга имеет статус территории опережающего социально-экономического развития (ТОСЭР).

В ходе апробации решались три основные задачи:

1. Тестирование личных кабинетов пользователей – модулей субъектов СОПКМ.

В результате в базе данных представлена информация от четырех учебных заведений профессионального образования, пяти работодателей, пяти индивидуумов и администрации. При наполнении базы данных особое внимание уделялось сопоставлению информации, вносимой разными субъектами. Например, внесение вакансий работодателем предполагает сопоставление их существующими в моногороде образовательными программами; внесение образовательных программ учебными заведениями предполагает сопоставление их с компетенциями, востребованными на рынке труда в разрезе профессий; внесение администрацией потенциальных резидентов ТОСЭР предполагает сопоставление их потребностей в кадрах с образовательными программами города и т.д. Это обеспечивает дополнительные возможности организации сетевого взаимодействия.

Также был протестирован функционал модулей по предоставлению информации из базы данных всем участникам сетевого взаимодействия через формирование запросов в личных кабинетах. Так, работодатель может получить информацию об образовательных программах, прогнозной численности выпускников, компетенциях, резюме индивидуумов и др. Была протестирована технология подключения субъектов к типовым модулям принятия решений.

2. Верификация корректности реализации моделей принятия решений в модуле типовых моделей принятия решений.

Были проверены три группы типовых моделей решений на примере исходных данных моногорода:

– на основе нечетких моделей, представленных на рис. 2, был проведен SWOT-анализ СОПК моногорода (оценены 24 фактора внешней и внутренней среды и 12 их комбинаций);

– на основе иерархической модели стратегического выбора было осуществлено оценивание альтернативных стратегических направлений развития СОПКМ в условиях сетевого взаимодействия;

– на основе интегральной модели оценки стратегического развития было произведено оценивание

СОПКМ по набору из 10 показателей на основе исторических данных за три года.

Корректность реализации моделей проверялась путем сопоставления результатов расчетов, полученных с помощью программного обеспечения, и расчетов, проведенных вручную.

3. Тестирование модуля работы с экспертами.

В ходе тестирования была создана экспертная группа из шести специалистов в области образования, экономики, муниципального управления, технологий и инноваций. Экспертная группа работала с заданиями на экспертизу по всем типовым моделям. Корректность реализации методов групповой экспертизы проверялась аналогично предыдущему пункту.

Таким образом, результаты апробации программного обеспечения прототипов показали возможность реализации принципов организации сетевого взаимодействия и выбранной технологии поддержки принятия решений.

Заключение

Получены следующие основные результаты, имеющие значение для развития цифровой поддержки системы опережающей подготовки кадрового моногорода:

– показана необходимость создания комплексной методологической базы и программной среды, в которой обеспечивается сетевое взаимодействие учебных заведений, работодателей, администрации моногорода, населения (индивидуумов), а также осуществляется поддержка процессов принятия решений в соответствии с задачами и требованиями субъектов СОПКМ;

– выявлены основные критерии и факторы принятия решений для каждого из субъектов СОПКМ в разрезе этапов анализа, выбора и контроля реализации; на данных критериях и факторах обоснованы необходимый функционал ИСОПКМ и требования к разработке математического и программного обеспечения;

– разработан состав модулей ИСОПКМ и технология их взаимодействия, полученные результаты функционального моделирования были положены в основу при разработке прототипа ИСОПКМ;

– разработанные прототипы отдельных модулей ИСОПКМ показали адекватность выбранного подхода к созданию цифровых инструментов поддержки мониторинга и принятия решений, имеющих возможности для выявления закономерностей, прогнозирования и планирования развития системы подготовки кадров для моногородов – территорий опережающего развития.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-013-00486А.

Литература

1. Об утверждении перечня монопрофильных муниципальных образований Российской Федерации (моногородов): Расп. Правительства РФ от 29.07.2014 № 1398-р

(ред. от 21.01.2020) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://legalacts.ru/doc/rasporjazhenie-pravitelstva-rf-ot-29072014-n-1398-r/#101269>, свободный (дата обращения: 29.05.2021).

2. Шаститко А.Е. Моногорода России: возможные варианты развития / А.Е. Шаститко, А.Ф. Фатихова // Государственное управление. Электронный вестник. – 2019. – № 76. – С. 109–135.

3. О территориях опережающего социально-экономического развития в Российской Федерации: Фед. закон от 29.12.2014 № 473-ФЗ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_172962/, свободный (дата обращения: 29.05.2021).

4. Иванова М.В. Тенденции и особенности развития моногородов в России и повышение их конкурентоспособности // Вестник Кемеровского гос. ун-та. Сер.: Политические, социологические и экономические науки. – 2018. – № 1. – С. 86–91.

5. Mulkeen J. Degree and Higher Level Apprenticeships: an empirical investigation of stakeholder perceptions of challenges and opportunities / J. Mulkeen et al. // Studies in higher education. – 2019. – Vol. 44, No. 2. – P. 333–346.

6. Захарова А.А. Специфика и технология создания информационного обеспечения системы опережающей подготовки кадров моногородов – территорий опережающего развития / А.А. Захарова, Я.В. Гребенюк, Л.Ю. Захаров // Информатизация образования и науки. – 2020. – № 2(46). – С. 162–180.

7. Лизунков В.Г. К вопросу о критериях эффективности взаимодействия образовательных организаций с предприятиями реального сектора экономики в условиях ТОР / В.Г. Лизунков, М.В. Морозова, А.А. Захарова, Е.Ю. Малушко // Вестник Мининского ун-та. – 2021. – Т. 9, № 1 (34). – С. 1–14.

8. Schomburg H. Carrying out tracer studies. Guide to anticipating and matching skills and jobs. – Vol. 6 // ETF, Luxembourg, Publications Office of the European Union. – 2016. – 300 p.

9. Mahesh M. Labour market information system / M. Mahesh, S. Naitik // International journal of Application or Innovation in Engineering and Management (IJAIEM). – 2014. – Vol. 3, Iss. 3. – P. 534–541.

10. Barani G. Quality indicators of hidden curriculum in centers of higher education / G. Barani, F. Azma, S.H. Seyyedrezai // Procedia – Social and Behavioral Sciences 2011. – Vol. 30. – P. 1657–1661.

11. Urintsov A. Individual learning trajectories as a key educational tool in the information society / A. Urintsov, V. Dik // Smart digital futures. – 2014. – Vol. 262. – P. 652–656.

12. Ванкевич Е.В. Информационно-аналитическая система рынка труда и прогнозирования потребности в кадрах: содержание и направления формирования в республике Беларусь / Е.В. Ванкевич, Э. Кастел-Бранко // Белорус. экономический журнал. – 2017. – № 2 (79). – С. 73–92.

13. Создание системы прогнозирования потребностей в профессиональном кадровом обеспечении социально-экономического развития РФ [Электронный ресурс] // ИБС. – Режим доступа: <https://ibs.ru/projects/minobrnauki-rf-sozdanie-sistemy-prognozirovaniya-potrebnoyev-v-professionalnom-kadrovom-obespechenii-sotsialno-ekonomicheskogo-ravzvitija-rf/> свободный (дата обращения: 29.05.2021).

14. Создание подсистемы моделирования и прогнозирования кадрового обеспечения промышленности в рамках государственной информационной системы промышленности [Электронный ресурс] // ИБС. – Режим доступа: <https://ibs.ru/projects/minpromtorg-rf-sozdanie-pod->

[sistemy-modelirovaniya-i-prognozirovaniya-kadrovogo-obespecheniya-promyshlennosti-v-ramkakh-gosudarstvennoy-informatsionnoy-sistemy-promyshlennosti/](https://ibs.ru/projects/minpromtorg-rf-sozdanie-pod-sistemy-modelirovaniya-i-prognozirovaniya-kadrovogo-obespecheniya-promyshlennosti-v-ramkakh-gosudarstvennoy-informatsionnoy-sistemy-promyshlennosti/), свободный (дата обращения: 29.05.2021).

15. Zakharova A.A. Formalization of Typical Problems of Decision Making on the Basis of Expert Knowledge in the Priority Personnel Training System for Monotowns / A.A. Zakharova, L.Yu. Zakharov // Advances in Economics, Business and Management Research. – 2020. – Vol. 156. – P. 77–81.

Захарова Александра Александровна

Д-р техн. наук, доцент, проф. каф. автоматизированных систем управления (АСУ)

Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)

Вершинина ул., 74, г. Томск, Россия, 634045

ORCID: 0000-0002-2379-8698

Тел.: +7 (382-2) 70-15-36

Эл. почта: zacharova@mail.ru

Захаров Леонид Юрьевич

Студент каф. АСУ ТУСУРа

Вершинина ул., 74, г. Томск, Россия, 634045

Тел.: +7 (382-2) 70-15-36

Эл. почта: planetside2001n@gmail.com

Zakharova A.A., Zakharov L.Yu.

Information system to support an advanced training of personnel for a monotown: concept, functions and composition of modules

The work considers one of the most important aspects for the development of monotowns in modern conditions - the creation of a system that enables an advanced training of personnel for monotown (SATPM), and ensures the implementation of the chosen strategy of a single-industry city. The task to develop a comprehensive methodological base and software environment is set up. This environment provides a network interaction of educational institutions, employers, administration of a monotown, and its population (individuals), as well as a support tool for decision-making processes in accordance with its tasks and requirements. Based on the criteria and information needs of SATPM entities making decisions, conceptual methodological principles of software development are formulated. The results of functional modeling of the information system of advanced training for monotown, the composition of the modules and the technology of their interaction are presented.

Keywords: monotown, advanced training of personnel, information system, decision making, functional modeling, module.

doi: 10.21293/1818-0442-2021-24-3-62-68

References

1. *Ob utverzhdenii perechnya monopofil'nykh municipal'nykh obrazovaniy Rossijskoj Federacii (monogorodov)* [Approval of the list of single-industry municipalities of the Russian Federation (monotowns)]: government order of RF, 29.07.2014, N 1398-p (addition on 21.01.2020). Available at: <https://legalacts.ru/doc/rasporjazhenie-pravitelstva-rf-ot-29072014-n-1398-r/#101269>, free. (Accessed: May 29, 2021) (in Russ.).

2. Shastitko A.E., Fatihova A.F. *Monogoroda Rossii: vozmozhnye varianty razvitiya* [Monotowns of Russia: Possible Development Options]. *Gosudarstvennoe upravlenie. Elektronnyj vestnik*, 2019, no. 476 pp. 109–135 (in Russ.).

3. *O territoriyah operezhayushchego social'no-ekonomicheskogo razvitiya v Rossijskoj Federacii* [On territories of advanced social and economic development in the Russian Federation]: Feder. Law, 29.12.2014, no 473-FZ. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_172962/, free (Accessed: May 29, 2021) (in Russ.).

4. Ivanova M.V. [Tendencies and features of development of Russian monotowns and their competitive recovery]. *Vestnik Kemerovskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Politicheskie, sociologicheskie i ekonomicheskie nauki*, 2018, no. 1, pp. 86–91 (in Russ.).

5. Mulkeen J. et al. Degree and Higher Level Apprenticeships: an empirical investigation of stakeholder perceptions of challenges and opportunities, *Studies in higher education*, 2019, vol. 44, no 2, pp. 333–346.

6. Zaharova A.A., Grebenyuk YA.V., Zakharov L.YU. [Specifics and development technology of information support of personnel advanced training system of single- industry - territories of advanced development] // *Informatizaciya obrazovaniya i nauki*, 2020, no. 2 46, pp. 162–180 (in Russ.).

7. Lizunkov V.G., Morozova M.V., Zakharova A.A. Malushko E.YU. [Evaluation criteria for education institutions-industry collaboration: territories of advanced development (PAD) environment]. *Vestnik Mininskogo universiteta*, 2021, vol. 9., no. 1(34), pp. 1–14 (in Russ.).

8. Schomburg H. *Carrying out tracer studies. Guide to anticipating and matching skills and jobs. Volume 6*. ETF, Luxembourg, Publications Office of the European Union, 2016. 300 p. doi:10.2816/938667.

9. Mahesh M. Naitik S. Labour market information system. *International journal of Application or Innovation in Engineering and Management (IJAIEM)*, 2014, vol. 3, iss. 3, pp. 534–541.

10. Barani G., Azma F., Seyyedrezai S.H. Quality indicators of hidden curriculum in centers of higher education. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 2011, vol. 30, pp. 1657–1661.

11. Urintsov A., Dik V. Individual learning trajectories as a key educational tool in the information society. *Smart Digital Futures*, 2014, vol. 262, pp. 652–656.

12. Vankevich A., Castel-Branco E. [Labour market information system and skills anticipation (LMIS): content and

directions of formation in the Republic of Belarus]. *Belarusian Economic Journal*, 2017, no. 2 (79), pp. 73–92.

13. Sozdanie sistemy prognozirovaniya potrebnoej v professional'nom kadrovom obespechenii social'no-ekonomicheskogo razvitiya RF [Creation of a system for forecasting the needs for professional staffing of the socio-economic development of the Russian Federation]. IBS. Available at: <https://ibs.ru/projects/minobrmavki-rf-sozdanie-sistemy-prognozirovaniya-potrebnoej-v-professionalnom-kadrovom-obespechenii-sotsialno-ekonomicheskogo-razvitiya-rf/>, free (Accessed: May 29, 2021) (in Russ.).

14. Sozdanie podsistemy modelirovaniya i prognozirovaniya kadrovogo obespecheniya promyshlennosti v ramkah gosudarstvennoj informacionnoj sistemy promyshlennosti [Creation of a subsystem for modeling and forecasting the staffing of industry within the framework of the state information system of industry] // IBS. Available at: <https://ibs.ru/projects/minpromtorg-rf-sozdanie-podsistemy-modelirovaniya-i-prognozirovaniya-kadrovogo-obespecheniya-promyshlennosti-v-ramkah-gosudarstvennoj-informatsionnoj-sistemy-promyshlennosti/>, free (Accessed: May 29, 2021) (in Russ.).

15. Zakharova A.A., Zakharov L.Yu. Formalization of Typical Problems of Decision Making on the Basis of Expert Knowledge in the Priority Personnel Training System for Monotowns. *Advances in Economics, Business and Management Research*, 2020, vol. 156., pp. 77–81.

Alexandra A. Zakharova

Doctor of Science in Engineering, Professor,
Department of Automated Control Systems (ACS),
Tomsk State University of Control Systems
and Radioelectronics (TUSUR)
74, Vershinin st., Tomsk, Russia, 634045
ORCID: 0000-0002-2379-8698
Phone: +7 (382-2) 70-15-36
Email: zacharova@mail.ru

Leonid Yu. Zakharov

Student, Department of ACS, TUSUR
74, Vershinin st., Tomsk, Russia, 634045
Phone: +7 (382-2) 70-15-36
Email: planetside2001n@gmail.com

УДК 519.876.5

А.А. Мицель, А.С. Шильников

Имитационные модели систем оплаты труда

Обсуждается вопрос о моделировании систем оплаты труда (СОТ). Данные модели играют ключевую роль в расчётном модуле систем поддержки принятия решений (СППР) в области СОТ. Предлагается два подхода к созданию моделей систем оплаты труда: 1) разработка статистических моделей; 2) создание имитационных моделей. В данной работе рассматривается второй подход, а именно, предложены имитационные модели различных систем оплаты труда. На основе синтетических данных получены функции распределения вероятностей для результирующих показателей СОТ для различных комбинаций распределений исходных данных, оценены статистические характеристики показателей СОТ, а также вероятности эффективного использования СОТ.

Ключевые слова: системы оплаты труда, имитационное моделирование, распределение вероятностей, закономерности систем оплаты труда, удовлетворенность трудом, выработка, качество продукции, фонд оплаты труда, нормальное распределение, экспоненциальное распределение, Хи-квадрат-распределение, гамма-распределение.

doi: 10.21293/1818-0442-2021-24-3-69-73

В условиях роста технологического прогресса, глобализации экономики заработная плата становится чрезвычайно важным фактором, способствующим развитию отечественной экономики. Ежедневно решаются сложные, разноплановые задачи, соответственно, изменяются социально-трудовые отношения работника и работодателя. Предприятие становится сложной экономической системой, где непрерывно принимаются управленческие решения (УР).

Для лиц, принимающих решения (ЛПР), смоделировать реакцию персонала на УР и экономическую эффективность от УР является нетривиальной задачей. Ведь каждый сотрудник, а тем более коллектив представляет сложную интеллектуально-эмоциональную систему.

Система оплаты труда (СОТ) призвана опираться на количественное и качественное содержание труда, при этом соблюдать равновесие между выгодами работника и работодателя. Наличие системы поддержки принятия решений (СППР) для решения такой задачи стало бы мощным поддерживающим фактором для ЛПР.

Согласно данным платформы Web of Science по данной теме опубликовано более 200 000 исследований за последние 30 лет по всему миру. Работы, опубликованные в 2016–2021 гг., посвящены именно проблеме, заявленной в данной статье. Так, например, исследователей интересует изменение здоровья работников при переходе на сдельную оплату труда [1], влияние системы оплаты труда по возрастному и гендерному принципу [2–7]. Опубликованы работы с изысканиями на тему сочетания переменной части СОТ и коллективного вознаграждения, влияния СОТ на труд топ-менеджеров, вопросы гибкости СОТ и др. [3–5, 8, 9].

Что касается российской экономики, многие авторы публикаций, освещающих проблемы СОТ, сходятся во мнении, что для экономики России важным фактором является производительность труда. Главным образом, отмечается неэффективные и устаревшие СОТ [10–15]. Ключевую роль в многофакторной экономике могли бы сыграть СППР [16–18]. И это является актуальной научно-социальной зада-

чей для всего мирового сообщества [19–21]. Существующие ИТ-системы и СППР, такие как SAP, Oracle, BAAN, получили заслуженную популярность [22–24]. Однако все эти системы не несут прогностических функций в сфере СОТ. Бизнес нуждается в вероятностной оценке последствий УР, особенно при внедрении новых СОТ. Детерминированной же оценки несравнимо мало для принятия эффективных решений.

Актуальность темы состоит в повышении эффективности управления персоналом на предприятиях. Ключом к этому являются заработная плата и соответственно СОТ. В открытых источниках отсутствуют статистические данные для построения прогнозных моделей СОТ. По этой причине авторы предлагают построение имитационных моделей СОТ. Как итог на основе этих моделей возможно получить оценки таких характеристик параметров СОТ, как среднее значение, дисперсия и вероятность успешного использования СОТ на предприятиях.

Научная новизна и задача исследования

Научная новизна исследования состоит в разработке имитационных моделей СОТ. В рамках данной статьи представлены результаты моделирования различных СОТ.

Главные задачи, которые требуется решить в статье, – получить значения эмпирической функции распределения показателей СОТ, построить их интегральное распределение и оценить вероятности эффективного использования СОТ.

Проблема случайности и многовариантности СОТ

По нашему мнению, в создании вышеобозначенной СППР в области СОТ существуют две основные проблемы.

Во-первых – фактор случайности. Ключевыми параметрами оценки деятельности предприятия являются показатели выработки Q , качества продукции G , заработной платы W , степени удовлетворенности трудом Sat . К сожалению, статистические данные предприятий, особенно в динамике, по перечисленным параметрам отсутствуют. В итоге выявить закономерность показателей при смене СОТ₀ на СОТ₁ не представляется возможным.

Во-вторых, многовариативность. Для начисления оплаты труда учитывается множество параметров, начиная от тарифной ставки и заканчивая премией за качество, выработку, а также множество надбавок и бонусов. Результатом такой системы становятся высокая вариативность СОТ, помноженная на разновидности СОТ, и другие факторы. При одинаковой СОТ, например при сдельно-премиальной, порядок начислений на разных предприятиях может кардинально отличаться.

Пример вариативности. Возьмем 6 видов СОТ, всего для них можно задать 12 констант (или max или min), 5 переменных, которые могут принимать значения по одному из 4 законов распределения. Получаем количество вариантов результатов для сравнения: $1\ 024$ сочетаний переменных * $4\ 096$ сочетаний констант = $4\ 194\ 304$ вариантов сравнения СОТ. Расчет подтверждает многовариантность параметров СОТ и отсутствие закономерности их функционирования [25, 26].

Решение проблемы случайности и многовариантности СОТ

Решение проблем вариативности СОТ, случайности и неопределенности закона распределения наглядно представлено в табл. 1.

Таблица 1

Сравнение решений проблем вариативности СОТ

№ п/п	Решение	Суть
1	На основе статистических данных	Вероятностные прогнозы строятся на основании статистики. Понадобятся статистические данные по видам и результатам функционирования СОТ на разных предприятиях
2	На основе статистических моделей	На основе анализа статистических моделей выясняется плотность вероятностей появления тех или иных результатов функционирования СОТ
3	На основе имитационного моделирования	На основе имитационной модели СОТ получают сгенерированные показатели, которые подлежат исследованию и аналитике

Первый пункт табл. 1 касается решений, которые опираются на статистические данные. Реальной статистики {Q, G, W, Sat} по СОТ_n на текущий момент не существует. Для сравнительной аналитики различных видов СОТ и результатов их функционирования необходимо располагать данными, например, о ежемесячной выработке работниками разных предприятий с разным количественным составом, а затем сравнивать показатели по всем видам СОТ.

Поскольку в первом случае решение лежит в плоскости чрезвычайно проблематичного сбора статистических данных, мы полагаем, что целесообразно остановиться на рассмотрении вариантов 2 и 3 из табл. 1.

Работа по описанию статистических моделей – трудоёмкий, но результативный процесс. Этот подход рассмотрен в работе [25]. В данной статье мы

остановимся на имитационном моделировании. Впервые этот подход был рассмотрен нами в работе [26]. В этой работе на основе имитационного моделирования было проведено исследование соотношения ключевых показателей для различных СОТ. В частности, было показано, что для любых распределений исходных данных ключевые показатели (выработка, качество, фонд оплаты труда, удовлетворённость трудом) сдельной СОТ всегда будут больше, чем повременно-премиальной СОТ. В данной статье мы рассмотрим некоторые результирующие показатели ряда СОТ. Исходные данные для моделирования приведены в работе [26]. Сама же схема вычисления эмпирической функции распределения и её аппроксимация подробно описаны в учебном пособии [27].

Построение эмпирической функции распределения и оценка вероятности достижения заданного значения ключевых показателей СОТ

В табл. 2 приведены результаты обработки синтетических данных выработки (Q3) при сдельной СОТ.

Таблица 2

Расчет эмпирической функции распределения для Q3

i	Середина интервала X_i	Частота m_i	Относительная частота ω_i	$F(X_i)$
1	89,75	1088	0,0083	0,0083
2	90,25	608	0,0046	0,0129
3	90,75	1440	0,0110	0,0239
4	91,25	1760	0,0134	0,0374
5	91,75	4352	0,0332	0,0706
6	92,25	4896	0,0374	0,1079
7	92,75	7232	0,0552	0,1631
8	93,25	11840	0,0903	0,2534
9	93,75	11456	0,0874	0,3408
10	94,25	16288	0,1243	0,4651
11	94,75	13920	0,1062	0,5713
12	95,25	12896	0,0984	0,6697
13	95,75	13984	0,1067	0,7764
14	96,25	8832	0,0674	0,8438
15	96,75	9440	0,0720	0,9158
16	97,25	5792	0,0442	0,9600
17	97,75	3744	0,0286	0,9885
18	98,25	1504	0,0115	1

На рис. 1 приведена кривая интегральной функции распределения $F(X_i)$, аппроксимированная кубическими сплайнами.

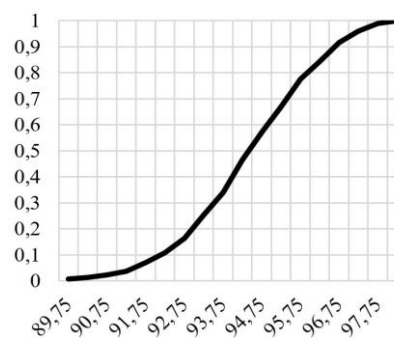


Рис. 1. Интегральное распределение величины Q3

Приведем несколько примеров значений функции по заданному уровню выработки (табл. 3)

Таблица 3
Вероятность достижения заданного уровня
показателя Q3

Заданное значение выработки, ед.	Вероятность достижения значения выше заданного
90	0,991
95	0,381
99	0,037

Как видно из рис. 1 и табл. 3, при сдельной СОР вероятность достигнуть высокой выработки в 90 ед. из возможных 100 ед. стремится к 1. Далее ситуация резко ухудшается. Вероятность достигнуть максимума в 100 ед. стремится к 0. Тем не менее стоит отметить, что минимальное значение выработки для сдельной СОР равняется 89,75 ед., что само по себе близко к максимуму выработки. Данный факт подтверждает давно известную закономерность в экономике труда, что при сдельной СОР работники стремятся к максимизации производства при понижении качества продукции.

Аналогичные результаты получены и для других ключевых результатов различных СОР. В табл. 4–6 приведены вероятности достижения заданного уровня качества продукции при сдельно-премиальной СОР (G4), удовлетворённости трудом при сдельно-премиальной (Sat4) и сдельно-прогрессивной СОР (Sat5).

Таблица 4
Вероятность достижения заданного уровня
показателя G4

Заданное значение выработки, %	Вероятность достижения значения выше заданного
80	0,998
85	0,911
90	0,406
95	0,053

При мотивации премиальной частью заработной платы за качество персонал стремится его достигать. Как следует из табл. 4 с вероятностью, стремящейся к 1, при введении премии за качество в сдельно-премиальной СОР будет достигнуто качество 80%. 90% качества продукции можно получить с вероятностью около 0,4. А от 95% и выше вероятность резко начинает стремиться к нулю. Результаты для данной СОР очень хорошие, учитывая, что выработка Q4 также будет на высшем уровне вследствие сдельной ставки. Однако у высоких показателей Q4 и G4 есть цена, а именно рекордно низкая удовлетворенность работников трудом (Sat4). Рассмотрим этот показатель далее.

Обратим внимание на несколько моментов. В сдельно-премиальной СОР, как отмечалось выше, большой уровень выработки (Q4) и качества (G4). Однако драматически низкий показатель удовлетворенности работников трудом Sat4, по сути, является противовесом. Как видно из табл. 5, с вероятностью 0,8 можно рассчитывать лишь на достижение уровня удовлетворенности в 10%. Уровень 20% трудно достижим, но реален, и приблизиться к 30% почти не представляется возможным. Такие математические данные полностью коррелируют со здравым и экономическим смыслом. При высокой выработке и

старании повышать качество продукции происходит так называемый «перегрев трудовых ресурсов», что ведет к низкой удовлетворенности трудом и как финал высокой текучести кадров.

Таблица 5
Вероятность достижения заданного уровня
показателя Sat4

Заданное значение выработки, %	Вероятность достижения значения выше заданного
10	0,805
15	0,405
20	0,122
30	0,002

Интересно оценить аналогичный показатель Sat5, удовлетворенность работников трудом при сдельно-прогрессивной СОР.

Таблица 6
Вероятность достижения заданного уровня
показателя Sat5

Заданное значение выработки, %	Вероятность достижения значения выше заданного
40	0,928
45	0,626
50	0,27
55	0,068

Обратим внимание, что Sat5 по сравнению с Sat4 имеет более высокие показатели удовлетворенности трудом. Так, практически гарантировано достигается 40% уровень удовлетворенности. В это же время становится весьма сложно добиться уровня выше 55%. Как видим, сравнение аналогичных показателей у разных СОР показывает адекватные результаты. Так, при сдельно-прогрессивной СОР удовлетворенность трудом находится на значительно более высоком уровне, чем при сдельно-премиальной СОР. Это связано с менее интенсивной стимуляцией персонала на достижение показателей, что не обрушивает их удовлетворенность трудом.

Выводы

Задачи, которые требовалось решить для получения вероятностной аналитики по результатам СОР: получить значения эмпирической функции распределения показателей СОР, построить их интегральное распределение и оценить вероятности эффективного использования СОР. В данной работе представлен расчет эмпирических функций распределения некоторых результирующих показателей сдельной СОР, сдельно-премиальной СОР и сдельно-прогрессивной СОР. Получены значения эмпирических функций распределения, графики их аппроксимации кубическими сплайнами, а также рассчитаны вероятности получения желаемых результатов.

Также в качестве основных выводов приведем характеристики СОР, согласно их интегральным распределениям результатов:

1. Сдельная СОР с выработкой Q3. Можно сказать, что функция имеет высокую скорость роста и высокий минимум. Это характеризует сдельную СОР как хорошо подходящую для стимулирования высокой выработки. Достижение показателя в 90 у.е. с вероятностью 0,99.

2. Сдельно-премиальную СОР с премией за качество можно охарактеризовать как высокопроизводительную, но и высокорисковую СОР. С вероятностью 0,99 будут достигнуты планка качества в 80% и выработка на уровне сдельной в 90 у.е., однако риск высокой «текучести кадров» стремится к 1.

3. Сдельно-прогрессивная СОР по итогам имитационного моделирования представляет компромиссный вариант в плане удовлетворенности трудом между сдельной и сдельно-премиальной СОР. Уровень удовлетворенности с вероятностью 0,9 будет находиться в районе среднего (40%), что частично защитит компанию от массовой «текучести кадров».

Литература

1. Habel J. Variable Compensation and Salesperson Health / J. Habel, S. Alavi, K. Linsenmayer // *Journal of Marketing*. – 2021. – Vol. 85 (3). – P. 130–149.

2. Chung C. Effects of wage-peak system on youth employment: Evidence from South Korea / C. Chung, K. Sung Hoon, C. Koangsung // *Applied Economics*. – 2021. – Vol. 53 (43). – P. 4975–4984.

3. Morris M. A Structured Compensation Plan Improves But Does Not Erase the Sex Pay Gap in Surgery / M. Morris, M. Melanie, D. Herb // *Annals of Surgery* / – 2018. – Vol. 268 (3). – P. 442–448.

4. Deelen A. Flexible Wages or Flexible Workers. A Decomposition of Wage Bill Adjustment by Dutch Firms, 2006–2013 // *De Economist*. – 2021. – No. 169. – P. 179–209.

5. Bechter B. Variable Pay Systems and/or Collective Wage Bargaining? Complements or Substitutes? / B. Bechter, N. Braakmann, B. Brandl // *ILR Review*. – 2021. – Vol. 74 (2). – P. 443–469.

6. Yang R. Tractable Compensation Plan under Asymmetric Information / R. Yang, Y. Mai, C.Y. Lee // *Prod. Oper. Manag.* – 2020. – No. 29. – P. 1212–1218.

7. Edmans A. Executive Compensation: A Modern Primer / A. Edmans, X. Gabaix // *Journal of Economic Literature*. – 2016. – Vol. 54 (4). – P. 1232–1243.

8. Bing Z. Executive compensation incentives, risk level and corporate innovation / Z. Bing, L. Yu-meng, S. Fangcheng // *Emerging Markets Review*. – 2021. – No. 47. – P. 153–166.

9. Chung K. Knowledge based decision support system / K. Chung, R. Boutaba, S. Hariri // *Inf Technol Manag.* – 2016. – No. 17. – P. 1–3.

10. Бобровникова А.И. Развитие форм и систем оплаты труда в условиях рыночной экономики России // *Территория науки*. – 2017. – № 2. – С. 175–178.

11. Кочелорова Г.В. Совершенствование порядка оплаты труда на предприятии // *Социально-экономический и гуманитарный журнал Красноярского ГАУ*. – 2018. – № 1 (7). – С. 28–41.

12. Соколова А.П. Система оплаты труда в коммерческих организациях / А.П. Соколова, И.А. Дуборкина // *Сервис в России и за рубежом*. – 2017. – Т. 11, № 2 (72). – С. 111–121.

13. Пути совершенствования организации оплаты труда на предприятии / Т.А. Филиппов, А.Ю. Жабунин, В.А. Экова, И.С. Шипунова // *Инновационная экономика: перспективы развития и совершенствования*. – 2018. – № 1 (27). – С. 171–175.

14. Слепцова Е.В. Оптимизация оплаты труда в современных условиях / Е.В. Слепцова, А.В. Князева // *Экономика и бизнес: теория и практика*. – 2017. – № 1. – С. 95–98.

15. Боржеш А.М. Методический подход к оценке результативности систем поддержки принятия управленческих решений в нефтегазовых корпорациях / А.М. Бор-

жеш, А.Н. Лебедев // *Научные ведомости Белгородского гос. ун-та*. – Сер.: Экономика. информатика. – 2018. – Т. 45, № 2. – С. 239–250.

16. Kitsios F. Decision Support Systems and Business Strategy: A conceptual framework for Strategic Information Systems Planning / F. Kitsios, M. Kamariotou // *Proceedings of 6th IEEE International Conference on IT Convergence and Security*. – Prague. – 2016. – P. 149–153.

17. Kaklauskas A. Biometric and Intelligent Decision Making Support // Switzerland: Pub.: Springer International Publishing. – 2015. – Vol. 81. – 220 p.

18. Демидовский А.В. Разработка распределенной лингвистической системы поддержки принятия решений / А.В. Демидовский, Э.А. Бабкин // *Бизнес-информатика*. – 2019. – Т. 13, № 1. – С. 18–32.

19. Rashidi M. Decision Support Systems / M. Rashidi, M. Ghodrat, B. Samali // *Management of Information Systems*. – 2018. – Vol. 2. – P. 19–38.

20. Aqel M. Decision Support Systems Classification in Industry / M. Aqel, O. Nakshabandi, A. Adeniyi // *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*. – 2019. – Vol. 7, No. 2. – P. 774–785.

21. Виноградова Е.Ю. Актуальные вопросы проектирования и реализации корпоративных систем поддержки принятия управленческих решений на предприятии // *Известия Дальневост. фед. ун-та. Экономика и управление*. – 2018. – № 1 (85). – С. 102–111.

22. Шведенко В.В. Информационное обеспечение взаимодействия процессного и функционального управления деятельностью предприятия // *Известия СПб. эконом. ун-та*. – 2019. – № 6 (120). – С. 90–94.

23. Карамышев А.Н. Анализ методологий процессного управления, полностью охватывающих бизнес-процессы предприятия // *Вестник Белгород. гос. технолог. ун-та им. В.Г. Шухова*. – 2017. – № 5. – С. 214–217.

24. Осипов В.И. Характеристика и направления развития систем управленческого учета // В.И. Осипов, А.А. Горина // *Вестник гос. ун-та управления*. – 2019. – № 5. – С. 40–47.

25. Шильников А.С. Управление системой оплаты труда на основе статистических моделей и моделирования / А.С. Шильников, А.А. Мицель // *Вестник Астрахан. гос. техн. ун-та*. – Сер.: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2021. – № 3. – С. 82–93.

26. Шильников А.С. Имитационное моделирование систем оплаты труда с учетом различных распределений случайных величин / А.С. Шильников, А.А. Мицель // *Прикладная математика и вопросы управления*. – 2020. – № 2. – С. 191–210.

27. Боровков А.А. *Прикладная статистика: учеб. для вузов*. – СПб.: Лань, 2021. – 704 с.

Мицель Артур Александрович

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
ORCID: 0000-0002-2624-4383
Тел.: 8-923-430-52-90
Эл. почта: maa@asu.tusur.ru

Шильников Александр Сергеевич

Аспирант каф. АСУ ТУСУРА
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0002-3297-6767
Тел.: 8-909-540-23-32
Эл. почта: alex.shilnikov@mail.ru

Mitsel A.A., Shilnikov A.S.

Statistical models for enterprise compensation system

The article discusses the topic of simulation modeling for compensation system (CS). These models are used as a core of the decision-making system (DSS) for the needs of compensation. The authors propose two solutions for compensation plan modeling: 1) Conceiving analytical statistical model; 2) Developing simulation model. The second solution is presented in the article. Some particular CS models are put forward. Based on the obtained synthetic data, following results are achieved: 1) probability densities functions of different CS result indicators are defined; 2) statistical characteristics of CS indicators are reviewed; 3) probability of CS efficiency is measured.

Keywords: compensation system, imitation modeling, probability density, compensation systems regularity, labor satisfaction, product output, product quality, wage fund, normal distribution, exponential distribution, Chi-square distribution, Gamma distribution.

doi: 10.21293/1818-0442-2021-24-3-69-73

References

- Habel J., Alavi S., Linsenmayer K. Variable Compensation and Salesperson Health. *Journal of Marketing*, 2021, no. 85(3), pp. 130–149.
- Chung C., Sung Hoon K., Koangsung C. Effects of wage-peak system on youth employment: Evidence from South Korea. *Applied Economics*, 2021, no. 53(43), pp. 4975–4984.
- Morris M., Melanie M., Herb D. A Structured Compensation Plan Improves But Does Not Erase the Sex Pay Gap in Surgery. *Annals of Surgery*, 2018, no. 268(3), pp. 442–448.
- Deelen A. Flexible Wages or Flexible Workers. A Decomposition of Wage Bill Adjustment by Dutch Firms, 2006–2013. *De Economist*, 2021, no. 169, pp. 179–209.
- Bechter B., Braakmann N., Brandl B. Variable Pay Systems and/or Collective Wage Bargaining? Complements or Substitutes? *ILR Review*, 2021, no. 74 (2), pp. 443–469.
- Yang R., Mai Y., Lee C.-Y. Tractable Compensation Plan under Asymmetric Information. *Production and Operations Management*, 2020, no. 29, pp. 1212–1218.
- Edmans A., Gabaix X. Executive Compensation: A Modern Primer. *Journal of Economic Literature*, 2016, no. 54(4), pp. 1232–1243.
- Bing Z., Yu-meng L., Fang-cheng S. Executive compensation incentives, risk level and corporate innovation. *Emerging Markets Review*, 2021, no. 47, pp. 153–166.
- Chung K., Boutaba R., Hariri S. Knowledge based decision support system. *Information Technology and Management*, 2016, no. 17, pp. 1–3.
- Bobrovnikova A.I. [Development of forms and systems of labor remuneration in the conditions of the market economy of Russia]. *Territory of Science*, 2017, no. 2, pp. 175–178 (in Russ.).
- Kochelova G.V. [Improving the order of remuneration at the enterprise] *Socio-economic and humanitarian journal of Krasnoyarsk State Agrarian University*, 2018, no. 1 (7), pp. 28–41 (in Russ.).
- Sokolova A.P., Duborkina I.A. [Remuneration system in commercial organizations] *Service in Russia and Abroad*, 2017, vol. 11, no. 2 (72), pp. 111–121 (in Russ.).
- Filippova T.A., Zhabunin A.Yu., Ekova V.A. [Ways to improve the organization of remuneration at the enterprise]. *Innovative economy: prospects for development and improvement*, 2018, no. 1(27), pp. 171–175 (in Russ.).
- Sleptsova E.V., Knyazeva A.V. [Optimization of labor remuneration in modern conditions]. *Economics and Business: Theory and Practice*, 2017, no. 1, pp. 95–98 (in Russ.).
- Borzhash A.M., Lebedev A.N. [Methodical approach to assessing the effectiveness of management decision support systems in oil and gas corporations]. *Scientific statements of the Belgorod State University. Series: Economics. Computer Science*, 2018, vol. 45, no. 2, pp. 239–250 (in Russ.).
- Kitsios F., Kamariotou M. Decision Support Systems and Business Strategy: A conceptual framework for Strategic Information Systems Planning. *Proceedings of 6th IEEE International Conference on IT Convergence and Security, Prague*, 2016, pp. 149–153.
- Kaklauskas A. Biometric and Intelligent Decision Making Support. Switzerland, Springer International Publishing Publ., 2015, vol. 81, 220 p.
- Demidovskiy A.V., Babkin E.A. [Development of a distributed linguistic decision support system]. *Business Informatics*, 2019, vol. 13, no. 1, pp. 18–32 (in Russ.).
- Rashidi M., Ghodrat M., Samali B. Decision Support Systems. *Management of Information Systems*, 2018, no. 2, pp. 19–38.
- Aqel M., Nakshabandi O., Adeniyi A. Decision Support Systems Classification in Industry. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, 2019, vol. 7, no. 2, pp. 774–785.
- Vinogradova E.Yu. [Topical issues of design and implementation of corporate management decision support systems at an enterprise]. *News of the Far Eastern Federal University. Economics and Management*, 2018, no. 1 (85), pp. 102–111 (in Russ.).
- Shvedenko V.V. [Information support of the interaction of process and functional management of the enterprise's activities]. *Bulletin of the St. Petersburg State Economic University*, 2019, no. 6 (120), pp. 90–94 (in Russ.).
- Karamyshev A.N. [Analysis of process management methodologies that fully cover the business processes of an enterprise]. *Bulletin of the Belgorod State Technological University. V.G. Shukhova*, 2017, no. 5, pp. 214–217 (in Russ.).
- Osipov V.I., Gorina A.A. [Characteristics and directions of development of management accounting systems]. *Bulletin of the State University of Management*, 2019, no. 5, pp. 40–47 (in Russ.).
- Shilnikov A.S., Mitsel A.A. [Management of the remuneration system based on statistical models and modeling]. *Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Engineering and Informatics*, 2021, no. 3, pp. 82–93 (in Russ.).
- Shilnikov A.S., Mitsel A.A. [Simulation modeling of compensation plan in terms of various distributions of random values]. *Applied Mathematics and Management Issues*, 2020, no. 2, pp. 191–210 (in Russ.).
- Borovkov A.A. *Prikladnaya statistika. Uchebnik dlya vuzov* [Applied statistics. Textbook for universities]. Saint-Petersburg, Lan Publ., 2021. 704 p. (in Russ.).

Artur A. Mitsel

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
ORCID: 0000-0002-2624-4383
Phone: +7-923-430-52-90
Email: maa@asu.tusur.ru

Aleksandr S. Shilnikov

Postgraduate student
Department of ACS, TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0002-3297-6767
Phone: +7-909-540-23-32
Email: alex.shilnikov@mail.ru

УДК 303.732.4:519.237

Е.А. Касьян, М.М. Немирович-Данченко

Применение метода анализа иерархий для выбора модели прогнозирования индекса потребительских цен России

Обсуждаются проблемы принятия решений при выборе модели прогнозирования на примере прогноза индекса потребительских цен (ИПЦ) России. Прогнозные значения ИПЦ получены на 2021–2023 гг. по пяти моделям. Для выбора наиболее приемлемой модели были сформулированы качественные критерии сравнимости моделей. Применение метода анализа иерархий позволило выбрать оптимальную модель для прогнозирования ИПЦ на основании синтеза количественных векторов предпочтений.

Ключевые слова: метод анализа иерархий Саати, моделирование, прогнозирование, индекс потребительских цен России.

doi: 10.21293/1818-0442-2021-24-3-74-79

Индекс потребительских цен (ИПЦ) является одним из инструментов измерения инфляции. Прогнозирование ИПЦ лежит в основе разработки перспективных программ развития экономики [1–3].

В современных условиях существует огромное множество методов прогнозирования, которыми необходимо не только уметь оперировать на практике, но и качественно выбирать наиболее подходящие из них применительно к конкретным задачам [4].

В данной работе рассмотрен ИПЦ России к декабрю предыдущего года с 1999 по 2020 г., а также рассчитаны прогнозные значения на 2021–2023 гг. Из использованных методов прогноза наиболее оптимальный выбран при помощи метода анализа иерархий Томаса Саати (МАИ) [5].

Индекс потребительских цен

Индекс потребительских цен выражается в процентах и отражает изменение во времени общего уровня цен на товары и услуги, приобретаемые населением для непроизводственного потребления. Наблюдение за потребительскими ценами в России осуществляется с 1991 г.

Для моделирования выбраны значения ИПЦ к декабрю предыдущего года в целом по России, данные взяты из официального интернет-источника Росстата [3]. Выбрана категория «Всего на товары и услуги» как самая общая и включающая в себя продовольственные товары, непродовольственные товары и платные услуги населению. В связи с тем, что в январе 1998 г. была проведена деноминация, в результате которой произошло уменьшение масштаба цен в 1000 раз, для качественных и показательных результатов выбраны года с 1999 по 2020 включительно. Период прогнозирования выбран равным трем годам, т.е. экономический прогноз будет краткосрочным [1].

Требования к данным

Для построения моделей использовались два параметра: значения ИПЦ к декабрю предыдущего года и время (год). Данные предварительно проанализированы на соответствие всем требованиям – сопоставимости данных, их полноты и однородности, а также устойчивости тренда [4, 6, 7].

1. Сопоставимость данных.

ИПЦ выражается только в процентах, следовательно, все элементы временного ряда имеют одинаковые единицы измерения. На протяжении всего исследуемого периода шаг наблюдений задан равным одному году. Данные ИПЦ взяты с официального источника Росстата [3], соответственно, методика расчета у всех элементов также одинаковая. Первое требование, сопоставимость данных, выполнено.

2. Полнота данных.

Взяты все имеющиеся значения ИПЦ (как было сказано ранее, с учетом проведенной деноминации), длина ряда получилась равной 22 годам. В данном случае с учетом природы ряда и постановки задачи прогнозирования будем считать полученную длину ряда достаточной для выбранного краткосрочного прогнозирования, равного трем годам.

3. Однородность данных.

С помощью критерия Ирвина было обнаружено только одно anomalous значение в 2000 г., поэтому для большей достоверности было принято решение не использовать сглаживание (истинные значения всегда лучше рассчитанных, при возможности стоит работать именно с ними).

4. Устойчивость тенденции.

В табл. 1 приведены коэффициенты автокорреляции, рассчитанные для проверки наличия тренда. Коэффициент автокорреляции ($R(k)$) может колебаться от -1 до $+1$ и определяет степень тесноты статистической связи между уровнями временного ряда. Значимость коэффициентов $R(k)$ проверялась при помощи критерия Стьюдента (для каждого коэффициента (r)) k рассчитывалась критериальная статистика, которая затем сравнивалась с критическим значением).

Таблица 1

Коэффициенты автокорреляции с временным лагом $k = 1-5$ для проверки наличия тренда

	$R(1)$	$R(2)$	$R(3)$	$R(4)$	$R(5)$
$t_{\text{стат}}$	2,653	1,601	0,879	0,368	0,303
$t_{\text{крит}}$	2,086	2,086	2,086	2,086	2,086

Коэффициент автокорреляции первого порядка значим (так как $t_{\text{стат}} > t_{\text{крит}}$), последующие коэффици-

енты не значимы – исследуемый ряд содержит слабый линейный тренд. Это означает, что в изменении уровней ряда закономерность преобладает над случайностью, дальнейшее прогнозирование имеет смысл.

Выбор методологии построения модели

Прогнозировать можно при помощи интуитивных методов, однако выбранный показатель ИПЦ России вполне поддается математическому описанию, поэтому в данном случае следует применять именно формализованные методы, которые дадут более точные результаты [6, 7].

В работе для прогнозирования ИПЦ России рассмотрены математические методы на основе построения статистических моделей [8].

Модели кривых роста

В моделях кривых роста в роли зависимой переменной выступает переменная y_t , а в роли единственной объясняющей переменной – время (t).

Параметры данных моделей оценивались по МНК. Согласно МНК, все наблюдения имеют равные веса, соответственно, тенденция развития на всем интервале неизменна [9].

В работе рассмотрены линейная модель кривой роста (ЛМКР) и квадратичная модель кривой роста (КМКР) как самые простые и допускающие содержательную интерпретацию. Для обеих моделей уровень надежности был задан равным 95%.

Полученные уравнения ЛМКР (1) и КМКР (2):

$$Y(t) = 121,024 - 0,879 \cdot t, \tag{1}$$

$$Y(t) = 127,248 - 2,435 \cdot t + 0,068 \cdot t^2. \tag{2}$$

Адекватность моделей и значимость коэффициентов a , b и c проверялись при помощи встроенного средства Microsoft Excel «Регрессия», полученные значения приведены в табл. 2.

Таблица 2

Значение и значимость коэффициента детерминации, значимость коэффициентов a, b, c

Коэффициент детерминации		Значимость коэффициента детерминации	Значимость коэффициентов уравнения	
ЛМКР	0,595	$2,6 \cdot 10^{-05} < 0,05$	a	$2,6 \cdot 10^{-05} < 0,05$
			b	$1,4 \cdot 10^{-23} < 0,05$
КМКР	0,708	$8,3 \cdot 10^{-06} < 0,05$	a	$1,4 \cdot 10^{-02} < 0,05$
			b	$5,8 \cdot 10^{-04} < 0,05$
			c	$2,0 \cdot 10^{-20} < 0,05$

Коэффициент детерминации служит для проверки адекватности модели – чем ближе R^2 к единице, тем выше качество модели.

Обе модели кривых роста получились адекватны и пригодны для дальнейших исследований, коэффициенты a, b для ЛМКР и a, b, c для КМКР также значимы. Стоит отметить, что, согласно полученному значению коэффициента детерминации, квадратичная модель кривой роста ($R^2 = 0,708$) получилась более значимой, чем линейная ($R^2 = 0,595$).

Модель простого скользящего среднего

Рассмотрена модель простого скользящего среднего (МПСС). Первоначально было вычислено среднее значение наблюдений, образующих

интервал сглаживания. Величина m – количество наблюдений, входящих в интервал сглаживания, было задано $m = 3$.

Модели экспоненциального сглаживания

В адаптивных моделях прогнозирования наблюдениям в выбранном окне присваиваются разные веса – в зависимости от их влияния на текущий уровень, что позволяет учитывать изменения в тенденции. Нами рассмотрены линейная и квадратичная модели экспоненциального сглаживания (ЛМЭС и КМЭС).

При построении моделей экспоненциального сглаживания [10] уровень надежности был задан равным 95%. Коэффициенты $a_0, a_1, (a_2)$ взяты из ранее полученных уравнений (1) и (2). Далее подбирались параметры α и β посредством изменения параметра сглаживания α в поисках наилучшего (наименьшего) значения ошибки MAPE. Затем были рассчитаны начальные условия $S_0^{(1)}, S_0^{(2)}, (S_0^{(3)})$ и оценки коэффициентов прогнозирующего полинома. Полученные параметры и начальные условия для ЛМЭС и КМЭС представлены в табл. 3.

Таблица 3

Полученные параметры и начальные условия для моделей экспоненциального сглаживания

Модель	α	β	MAPE	$S_0^{(1)}$	$S_0^{(2)}$	$S_0^{(3)}$
ЛМЭС	0,69	0,31	3,31%	121,4	121,8	–
КМЭС	0,27	0,73	2,67%	134,5	141,5	148,4

Точность моделей

Для проверки точности моделей рассчитывались MAPE, WAPE, RMSE, приведенные в табл. 4. Были выбраны именно эти ошибки, потому что они выражаются в процентах, что упрощает интерпретацию результатов. Кроме того, такой выбор обусловлен подробным сравнительным анализом некоторых ошибок, выполненным в [11–13].

Таблица 4

Значения ошибок

№	Модель	MAPE, %	WAPE, %	RMSE, %
1	ЛМКР	2,71	2,82	4,14
2	КМКР	2,49	2,58	3,52
3	МПСС	1,09	1,14	1,48
4	ЛМЭС	3,31	3,46	5,97
5	КМЭС	2,67	2,65	3,51

Будем считать, что ошибки, превышающие 5%, говорят о не очень высоком качестве используемой модели прогнозирования. По результатам трех рассмотренных ошибок самое высокое качество имеет МПСС, у которой значения ошибок прогноза не превышают 1,5%. Допустимое значение ошибки превышает только у ЛМЭС, согласно RMSE (5,97%), при этом значения MAPE и WAPE менее 5%, но больше, чем для других моделей, поэтому эта модель имеет самое низкое качество из рассмотренных моделей.

Прогнозирование

Прогнозирование базируется на поиске определенной закономерности развития внутри ряда, на основе которой строится дальнейший прогноз.

Некоторые модели позволяют на основе точечных прогнозов строить интервальные прогнозы.

При построении ЛМКР, КМКР, ЛМЭС и КМЭС задается точность прогноза, в данной работе использовалась точность 95% как самая общепринятая, точность менее 90%, как правило, вообще не используется. При этом для МПСС точность прогноза априори задать нельзя.

В табл. 5 приведены точечные прогнозы на ближайшие три года по всем пяти рассмотренным моделям и для наглядности приведены истинные значения за последние пять лет.

Исходя из сводного графика, приведенного на рис. 1, МПСС, ЛМЭС и КМЭС имеют очень близкие значения и визуально ведут себя лучше всего среди пяти использованных моделей. Таким образом, можно предположить, что именно эти модели дают наиболее вероятные значения. При этом в данном случае прогноз ЛМКР показал наихудшие резуль-

таты – на графике смотрится наименее правдоподобно и выглядит как аномалия.

Таблица 5

Сводная таблица истинных значений за последние 5 лет и точечных прогнозов на ближайшие 3 года

Год	ЛМКР	КМКР	МПСС	ЛМЭС	КМЭС
2016	105,39				
2017	102,51				
2018	104,26				
2019	103,04				
2020	104,91				
2021	100,81	107,22	104,69	105,12	103,56
2022	99,93	107,98	104,14	105,59	103,26
2023	99,05	108,87	104,40	106,07	103,00

Для моделей кривых роста и экспоненциального сглаживания были также построены интервальные прогнозы, значения которых представлены в табл. 6. Среди интервальных прогнозов наилучшие результаты показала КМЭС, имея как минимум в пять раз меньший интервал, чем остальные.

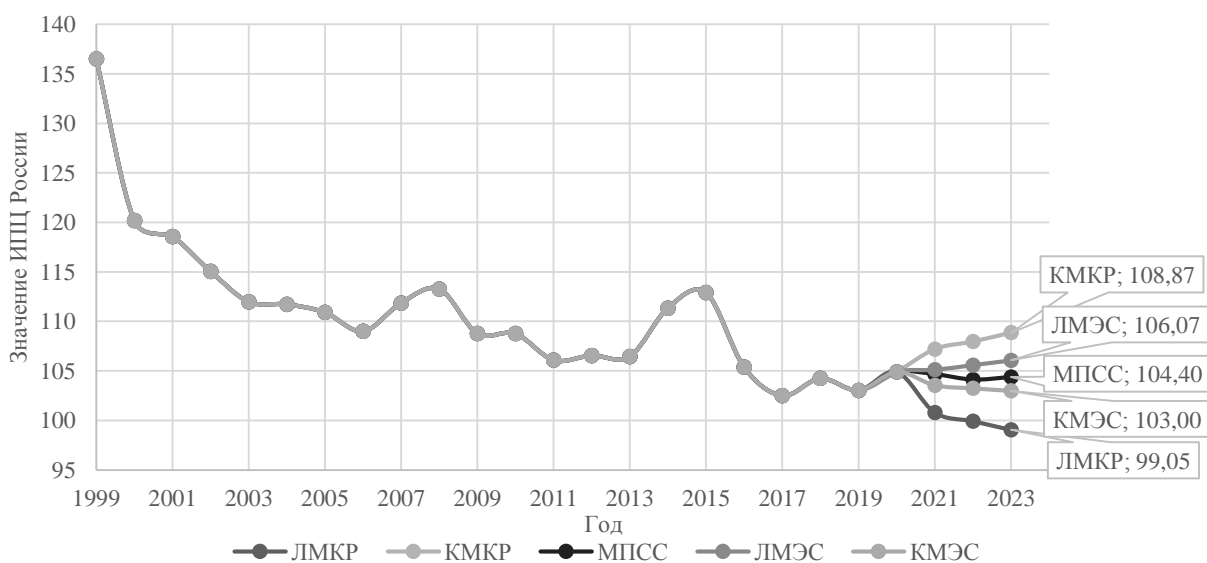


Рис. 1. График истинных значений ИПЦ России с 1999 по 2020 г. и точечных прогнозов по 5 рассмотренным моделям на ближайшие 3 года

Таблица 6

Сводная таблица интервальных прогнозов на ближайшие 3 года

Модель	Год	Левая граница	Правая граница	Интервал
ЛМКР	2021	90,11	111,50	21,39
	2022	89,11	110,74	21,63
	2023	88,10	109,99	21,89
КМКР	2021	98,13	116,30	18,16
	2022	98,79	117,16	18,37
	2023	99,58	118,17	18,59
ЛМЭС	2021	101,520	108,727	7,207
	2022	101,928	109,262	7,334
	2023	102,334	109,797	7,463
КМЭС	2021	101,442	105,681	4,240
	2022	101,099	105,413	4,314
	2023	100,803	105,193	4,390

Учитывая, что в данной работе мы исследовали ИПЦ России, который исчисляется в процентах, то

интервал КМЭС около 4% в принципе допустим, интервалы ЛМКР ($\approx 18\%$) и КМКР ($\approx 21\%$) не несут никакого смысла и в данном случае бесполезны.

Если сравнить полученные точечные прогнозы по пяти моделям со значениями интервального прогноза по КМЭС как самого наилучшего, то данным интервалам соответствуют значения точечных прогнозов по МПСС, ЛМЭС и КМЭС для каждого года соответственно, значения обеих моделей кривых роста в данные интервалы не вошли.

Метод анализа иерархий (МАИ) Саати и выбор оптимального метода прогноза

При выборе наилучшего метода прогнозирования ИПЦ России использовался метод анализа иерархий (МАИ) Саати. Экспертные оценки составлялись одним из авторов.

Метод анализа иерархий состоит из этапа декомпозиции проблемы на более простые составные части

и этапа синтеза вектора предпочтений путем нахождения количественных отношений через качественные суждения. МАИ позволяет эксперту выбрать наилучший вариант решения из множества существующих альтернатив согласно его пониманию сути проблемы и требованиям к ее решению [5, 14]. Основным достоинством метода анализа иерархий является его высокая универсальность, что подтверждается появившимися в последние годы работами – по принятию решений в медицине [15], при оценке оползневой опасности [16] и при выборе новых материалов и конструкций в промышленном производстве [17].

На этапе декомпозиции проблема была структурирована в виде иерархии, которая в простейшем виде включает в себя цель, критерии, альтернативы.

Цель – выбрать оптимальный метод для прогнозирования ИПЦ России к декабрю предыдущего года.

Критерии:

1. Близость результатов к остальным методам (БМ).
2. Интуитивно-визуальное превосходство прогноза по графику (Г).

3. Точность прогноза (ТП).
4. Простота расчетов (ПР).
5. Интервальный прогноз (ИП).

Альтернативы:

1. ЛМКР.
2. КМКР.
3. МПСС.
4. ЛМЭС.
5. КМЭС.

Далее была построена обратно-симметричная матрица парных сравнений для критериев для дальнейшего определения их приоритетности (исходя из степени важности каждого критерия относительно каждого другого критерия), приведенная в табл. 7. Для сравнения Саати предложил использовать качественные признаки, переводимые потом в количественные по 9-балльной шкале, где 1 означает одинаковую значимость сравниваемых элементов матрицы, 9 – абсолютную значимость, т.е. элемент в высшей степени предпочтительнее другого [14].

Таблица 7

Вектор локальных приоритетов по каждому критерию

Критерий	БМ	Г	ТП	ПР	ИП	Оценка компонент собственного вектора (W_i)	Нормализованная оценка компонент собственного вектора (w_i)
БМ	1,00	2,00	0,50	7,00	6,00	2,112	0,281
Г	0,50	1,00	0,33	6,00	5,00	1,380	0,184
ТП	2,00	3,00	1,00	9,00	8,00	3,366	0,448
ПР	0,14	0,17	0,11	1,00	0,33	0,245	0,033
ИП	0,17	0,20	0,13	3,00	1,00	0,416	0,055
					Σ	7,519	1,000

Для оценки компонент собственного вектора вычисляется произведение элементов строки, возведенное в степень $1/n$ (3), затем проводится нормализация (4).

$$W_i = (a_{i1} \cdot a_{i2} \cdot \dots \cdot a_{in})^{1/n}, \quad (3)$$

где a_{in} – элементы каждой строки, n – число критериев.

$$w_i = \frac{W_i}{\sum_{i=1}^n W_i}. \quad (4)$$

На данном этапе наиболее значимым критерием при выборе метода прогнозирования получился критерий «точность прогноза», а наименее значимым – «простота расчетов» (см. табл. 7).

Затем для каждого критерия была построена аналогичная матрица парных сравнений по альтернативам (5 матриц размерностью 5x5) и по (3)–(4) вычислены компоненты векторов предпочтений.

По каждой из полученных 6 матриц вычислено отношение согласованности (ОС) и сделана проверка экспертных оценок на непротиворечивость, результаты приведены в табл. 8.

Для проверки согласованности суждений каждая матрица парных сравнений умножается справа на нормализованную оценку вектора приоритетов, полученный столбец покомпонентно делится на элементы собственного вектора. Среднее значение полученных чисел называется максимальным собственным значением матрицы λ_{max} . В идеальном случае это

собственное значение совпадает с размерностью матрицы n . Для оценки степени неидеальности с использованием λ_{max} вычисляется индекс согласованности ИС (5), а затем отношение согласованности (6)

$$ИС = \frac{(\lambda_{max} - n)}{(n - 1)}, \quad (5)$$

$$ОС = \frac{ИС}{СИ}. \quad (6)$$

Здесь СИ – случайный индекс согласованности, который определяется в зависимости от порядка матрицы. Для матрицы 5x5 СИ = 1,12.

Таблица 8

Отношение согласованности для всех матриц парных сравнений

№	Матрица парных сравнений	Отношение согласованности, %
1	Для критериев	4,1
2	Для альтернатив по БМ	4,4
3	Для альтернатив по Г	4,7
4	Для альтернатив по ТП	2,9
5	Для альтернатив по ПР	4,8
6	Для альтернатив по ИП	9,7

Оценки для всех матриц получились согласованными в том смысле, который предложен Т. Саати [5], т.е. все оценки имеют отношение согласованности не более 10%. Самой согласованной получилась матрица парных сравнений для альтернатив по критерию

«точность прогноза» – ее согласованность составила 2,9%.

На заключительном этапе был сделан синтез локальных приоритетов. В табл. 9 представлены упорядоченные глобальные приоритеты альтернатив, на основе которых выбрано наилучшее решение (оптимальная альтернатива).

Таблица 9

Упорядоченный синтез локальных приоритетов

№	Альтернативы	Глобальные приоритеты
1	МПСС	0,420
2	КМЭС	0,199
3	ЛМЭС	0,150
4	КМКР	0,148
5	ЛМКР	0,083

Согласно проведенному оцениванию по МАИ, предпочтение следует отдать МПСС.

Заключение

В работе предложено применение метода анализа иерархий Саати для выбора оптимальной модели прогнозирования. В качестве исследуемого показателя выбран индекс потребительских цен России к декабрю предыдущего года. Было построено пять моделей: линейная модель кривой роста (ЛМКР), квадратичная модель кривой роста (КМКР), модель простого скользящего среднего (МПСС), линейная модель экспоненциального сглаживания (ЛМЭС), квадратичная модель экспоненциального сглаживания (КМЭС).

По результатам применения МАИ выбрана оптимальная модель для прогнозирования ИПЦ – модель простого скользящего среднего.

Результаты данной работы могут быть применены для анализа ИПЦ России, для самостоятельного выбора оптимального метода прогнозирования ИПЦ России к декабрю предыдущего года (так как результаты МАИ Саати несут субъективный характер), а также для аналогичного выбора метода прогнозирования для иных экономических показателей.

Литература

1. Чупина С.В. Прогнозирование национальной экономики: учеб. пособие. – Томск: ТГПУ, 2010. – 143 с.
2. International Labour Office (ILO) and others, Consumer Price Index Manual: Theory and Practice (Geneva, ILO, 2004) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.ilo.org/global/statistics-and-databases/WCMS_331153/lang--en/index.htm, свободный (дата обращения: 12.10.2021).
3. Федеральная служба государственной статистики [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://rosstat.gov.ru/>, свободный (дата обращения: 01.03.2021).
4. Хайруллина О.И. Эконометрика: базовый курс / О.И. Хайруллина, О.В. Баянова. – Пермь, 2019. – 176 с.
5. Saaty T.L. How to Make a Decision: The Analytic Hierarchy Process // European Journal of Operational Research. – 1990. – Vol. 48, No. 1. – P. 9–26.
6. Айвазян С.А. Теория вероятностей и прикладная статистика / С.А. Айвазян, В.С. Мхитарян. – М.: ЮНИТИ, 2001. – 656 с.
7. Галочкин В.Т. Эконометрика: учеб. и практикум для бакалавриата и специалитета. – М.: Юрайт, 2019. –

288 с. – ЭБС Юрайт [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.urait.ru/bcode/431440>, свободный (дата обращения: 17.06.2021).

8. Бабешко Л.О. Эконометрика и эконометрическое моделирование в Excel и R / Л.О. Бабешко, И.В. Орлова. – М.: Науч.-изд. центр ИНФРА-М, 2021. – 296 с.

9. Выбор метода прогнозирования основных статистических показателей работы ГБУЗ «НИИ СП им. Н.В. Склифосовского» / Б.Л. Курилин, В.Я. Киселевская-Бабинина, Н.А. Карасёв, И.В. Киселевская-Бабинина, Е.В. Кислухина, В.А. Васильев // Журнал им. Н.В. Склифосовского «Неотложная медицинская помощь». – 2019. – Т. 8, № 3. – С. 246–256.

10. Brown R.G., Meyer R.F. The fundamental theorem of exponential smoothing // Oper. Res. – 1961. – Vol. 9, No 5. – P. 673–685.

11. Box G.E.P. Time Series Analysis, Forecasting, and Control / G.E.P. Box, G.M. Jenkins, G.C. Reinsel. – Hoboken, New Jersey, 2015. – 712 p.

12. Vandepu N. Data Science for Supply Chain Forecasting. – Berlin, Boston: De Gruyter, 2021. – 395 p.

13. Chai T. Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? / T. Chai, R.R. Draxler // Geosci. Model Dev. – 2014. – No. 7. – P. 1247–1250. doi:10.5194/gmd-7-1247-2014

14. Saaty T.L. Axiomatic Foundation of the Analytic Hierarchy Process // Management Science. – 1986. – Vol. 32, No. 7. – P. 841–855.

15. Improta G. Use of the AHP methodology in system dynamics: Modelling and simulation for health technology assessments to determine the correct prosthesis choice for hernia diseases / G. Improta, M. Russo, M. Triassi, G. Converso, T. Murino, L. Santillo // Mathematical Biosciences. – 2018. – Vol. 299. – P. 19–27. doi: 10.1016/j.mbs.2018.03.004

16. Kumar R. Landslide Susceptibility Mapping Using Analytical Hierarchy Process (AHP) in Tehri Reservoir Rim Region, Uttarakhand / R. Kumar, A. Rathinam // Journal of the Geological Society of India. – 2016. – Vol. 87, No. 3. – P. 271–286. doi:10.1007/s12594-016-0395-8

17. Abbas M. Make a Decision to use AHP for the Selection of Materials and Designs for Minimizing Environmental Impacts by the POPE Lawn Mower Manufacturing / M. Abbas, M. Almkhtar, Z. Tameemi, H. Sharaf, M. Ashham // International Journal of Engineering & Technology Sciences. – 2018. – Vol. 7. – P. 672–676.

Касьян Елизавета Александровна

Студент кафедр. безопасности информационных систем (БИС) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-983-346-55-30
Эл. почта: meelisie@yandex.ru

Немирович-Данченко Михаил Михайлович

Д-р физ.-мат. наук, проф. каф. комплексной информационной безопасности электронно-вычислительных систем (КИБЭВС) ТУСУРА Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-906-199-99-95
Эл. почта: michnd@mail.ru

Kasyan E.A., Nemirovich-Danchenko M.M.

Application of the Analytic Hierarchy Process for choosing a forecasting model for the consumer price index in Russia

The work is devoted to solving the problem of decision-making when choosing a forecasting model on the example of the forecast of the consumer price index (CPI) of Russia. Projections of the CPI were obtained for 2021-2023 on five models. To select the most acceptable model, the qualitative criteria for comparability of models were formulated. The application of the hierarchy analysis method allowed to choose the optimal model to predict the CPI based on the synthesis of quantitative preference vectors.

Keywords: Saaty's AHP method, modeling, forecasting, consumer price index of Russia.

doi: 10.21293/1818-0442-2021-24-3-74-79

References

1. Chupina S.V. Prognozirovaniye natsional'noi ekonomiki: uchebnoye posobie [Forecasting the national economy: a tutorial]. Tomsk State Pedagogical University, 2010, 143 p. (in Russ.).
2. International Labour Office (ILO) and others, Consumer Price Index Manual: Theory and Practice (Geneva, ILO, 2004). https://www.ilo.org/global/statistics-and-databases/WCMS_331153/lang--en/index.htm (Accessed: March 01, 2021) (in Russ.).
3. [Federal State Statistics Service]. Available at: <https://rosstat.gov.ru/>, free. (Accessed: March 10, 2021) (in Russ.).
4. Khairullina O.I., Bayanova O. V. *Ekonometrika: bazovyyi kurs* [Econometrics: basic course]. Perm', 2019, 176 p. (in Russ.).
5. Saaty T.L. How to Make a Decision: The Analytic Hierarchy Process. *European Journal of Operational Research*, 1990, no. 48, pp. 9–26.
6. Aivazian S.A., Mkhitarian V.S. *Teoriya veroyatnostej i prikladnaya statistika* [Probability theory and applied statistics]. Moscow, 2001, 656 p. (in Russ.).
7. Galochkin V.T. *Ekonometrika: uchebnik i praktikum dlya bakalavriata i spetsialiteta* [Econometrics: Textbook and Workshop for Undergraduate and Specialist Degrees]. Moskva: Izdatel'stvo Yurait, 2019, 288 p. Available at: <https://www.urait.ru/bcode/431440> (Accessed: June 17, 2021) (in Russ.).
8. Babeshko L.O. *Ekonometrika i ekonomicheskoe modelirovaniye v Excel i R* [Econometrics and Econometric Modeling in Excel and R]. Moskva, Limited liability company «Nauchno-izdatel'skii tsentr INFRA-M», 2021, 296 p. (in Russ.).
9. Kurilin B.L., Kiselevskaya-Babinina V.YA., Karasyov N.A., Kiselevskaya-Babinina I.V., Kisluhina E.V., Vasil'ev V.A. Selection of Prediction Method of Basic Statistical Work Parameters of N.V. Sklifosovsky Research Institute for Emergency Medicine of the Moscow Healthcare Department. *Russian*

Sklifosovsky Journal «Emergency Medical Care», 2019, vol. 8, no. 3, pp. 246–256 (in Russ.).

10. Brown R.G., Meyer R.F. The fundamental theorem of exponential smoothing. *Operations Research*, 1961, vol. 9, no. 5, pp. 673–685.

11. Box G.E.P., Jenkins G.M., Reinsel G.C. *Time Series Analysis, Forecasting, and Control*. Hoboken, New Jersey, 2015, 712 p.

12. Vandepu N. *Data Science for Supply Chain Forecasting*. Berlin, Boston, De Gruyter, 2021, 395 p.

13. Chai T., Draxler R. Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? *Geoscientific Model Development*, 2014, no.7, pp.1247–1250. doi:10.5194/gmd-7-1247-2014.

14. Saaty T.L. Axiomatic Foundation of the Analytic Hierarchy Process. *Management Science*, 1986, vol. 32, no. 7, pp. 841–855.

15. Improta G., Russo M.A., Triassi M., Converso G., Murino T., Santillo L.C. Use of the AHP methodology in system dynamics: Modelling and simulation for health technology assessments to determine the correct prosthesis choice for hernia diseases. *Mathematical Biosciences*, 2018, no. 299, pp. 19–27. doi: 10.1016/j.mbs.2018.03.004

16. Kumar R., Anbalagan R. Landslide Susceptibility Mapping Using Analytical Hierarchy Process (AHP) in Tehri Reservoir Rim Region, Uttarakhand. *Journal of the Geological Society of India*, 2016, vol. 87, no. 3, pp. 271–286. doi:10.1007/s12594-016-0395-8

17. Abbas M., Almukhtar M., Tameemi Z., Sharaf H., Ashham M., Salman K. Make a Decision to use AHP for the Selection of Materials and Designs for Minimizing Environmental Impacts by the POPE Lawn Mower Manufacturing. *International Journal of Engineering & Technology Sciences*, 2018, vol. 7, no. 3.20, pp. 672–676.

Elizaveta A. Kasyan

Student, Department of Information System Security, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR) 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-983-346-55-30
Email: meelisia@yandex.ru

Mikhail M. Nemirovich-Danchenko,

Doctor of Science in Physics and Mathematics, Professor, Department of Complex Information Security of Computer Systems, TUSUR 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0002-4510-8045
Phone: +7-906-199-99-95
Email: michnd@mail.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

