

НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ ЗЕМЛИ

HIGH TECHNOLOGIES IN EARTH SPACE RESEARCH

Журнал **H&ES Research** издается с 2009 года, освещает достижения и проблемы российских инфокоммуникаций, внедрение последних достижений отрасли в автоматизированных системах управления, развитие технологий в информационной безопасности, исследования космоса, развитие спутникового телевидения и навигации, исследование Арктики. Особое место в издании уделено результатам научных исследований молодых ученых в области создания новых средств и технологий космических исследований Земли.

Журнал H&ES Research входит в перечень изданий, публикации в которых учитываются Высшей аттестационной комиссией России (ВАК РФ), в систему российского индекса научного цитирования (РИНЦ), а также включен в Международный классификатор периодических изданий.

Тематика публикуемых статей в соответствии с перечнем групп специальностей научных работников по Номенклатуре специальностей:

- 05.07.00 Авиационная и ракетно-космическая техника
- 05.12.00 Радиотехника и связь
- 05.13.00 Информатика, вычислительная техника и управление.

ИНДЕКСИРОВАНИЕ ЖУРНАЛА H&ES RESEARCH

- NEICON • CyberLenika (Open Science) • Google Scholar • OCLC WorldCat • Ulrich's Periodicals Directory • Bielefeld Academic Search Engine (BASE) • eLIBRARY.RU • Registry of Open Access Repositories (ROAR)

Все номера журнала находятся в свободном доступе на сайте журнала www.hes.ru и библиотеке elibrary.ru.

Всем авторам, желающим разместить научную статью в журнале, необходимо оформить ее согласно требованиям и направить материалы на электронную почту: HT-ESResearch@yandex.ru.

С требованиями можно ознакомиться на сайте: www.H-ES.ru.

Язык публикаций: русский, английский.

Периодичность выхода – 6 номеров в год.

Свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС 77-60899 от 02.03.2015

Территория распространения: Российская Федерация, зарубежные страны

Тираж 1000 экз. Цена 1000 руб.

Плата с аспирантов за публикацию рукописи не взимается.

© ООО "ИД Медиа Паблишер", 2022

H&ES Research is published since 2009. The journal covers achievements and problems of the Russian infocommunication, introduction of the last achievements of branch in automated control systems, development of technologies in information security, space researches, development of satellite television and navigation, research of the Arctic. The special place in the edition is given to results of scientific researches of young scientists in the field of creation of new means and technologies of space researches of Earth.

The journal H&ES Research is included in the list of scientific publications, recommended Higher Attestation Commission Russian Ministry of Education for the publication of scientific works, which reflect the basic scientific content of candidate and doctoral theses. IF of the Russian Science Citation Index.

Subject of published articles according to the list of branches of science and groups of scientific specialties in accordance with the Nomenclature of specialties:

- 05.07.00 Aviation, space-rocket hardware
- 05.12.00 RF technology and communication
- 05.13.00 Informatics, computer engineering and control.

JOURNAL H&ES RESEARCH INDEXING

All issues of the journal are in a free access on a site of the journal www.hes.ru and elibrary.ru.

All authors wishing to post a scientific article in the journal, you must register it according to the requirements and send the materials to your email: HT-ESResearch@yandex.ru.

The requirements are available on the website: www.H-ES.ru.

Language of publications: Russian, English.

Periodicity – 6 issues per year.

Media Registration Certificate PJ No. FS77-60899. Date of issue: March 2, 2015.

Distribution Territory: Russian Federation, foreign countries

Circulation of 1000 copies. Price of 1000 Rub.

Postgraduate students for publication of the manuscript will not be charged

© Media Publisher, 2022

СОДЕРЖАНИЕ

Учредитель:

ООО "ИД Медиа Пабlishер"

Издатель:

ДЫМКОВА С.С.

Главный редактор:

ЛЕГКОВ К.Е.

Редакционная коллегия:

БОБРОВСКИЙ В.И., д.т.н., доцент;

БОРИСОВ В.В., д.т.н., профессор,
Действительный член академии военных наук РФ;

БУДКО П.А., д.т.н., профессор;

БУДНИКОВ С.А., д.т.н., доцент,
Действительный член Академии информатизации образования;

ВЕРХОВА Г.В., д.т.н., профессор;

ГОНЧАРОВСКИЙ В.С., д.т.н., профессор,
заслуженный деятель науки и техники РФ;

КОМАШИНСКИЙ В.И., д.т.н., профессор;

КИРПАНЕВ А.В., д.т.н., доцент;

КУРНОСОВ В.И., д.т.н., профессор,
академик Международной академии информатизации, Действительный член Российской академии естественных наук;

МОРОЗОВ А.В., д.т.н., профессор,
Действительный член Академии военных наук РФ;

МОШАК Н.Н., д.т.н., доцент;

ПАВЛОВ А.Н., д.т.н., профессор;

ПРОРОК В.Я., д.т.н., профессор;

СЕМЕНОВ С.С., д.т.н., доцент;

СИНИЦЫН Е.А., д.т.н., профессор;

ШАТРАКОВ Ю.Г., д.т.н., профессор,
заслуженный деятель науки РФ.

Адрес издателя:

111024, Россия, Москва,
ул. Авиамоторная, д. 8, корп. 1, офис 323.

Адрес редакции:

194044, Россия, Санкт-Петербург,
Лесной Проспект, 34-36, к. 1,
Тел.: +7(911) 194-12-42.

Адрес типографии:

Россия, Москва, ул. Складочная, д. 3,
кор. 6.

Мнения авторов не всегда совпадают с точкой зрения редакции.
За содержание рекламных материалов редакция ответственности не несет.
Материалы, опубликованные в журнале – собственность ООО "ИД Медиа Пабlishер".
Перепечатка, цитирование, дублирование на сайтах допускаются только с разрешения издателя.

РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

Поборчая Н.Е., Лобова Е.О.

Анализ использования фильтра Калмана в процедуре детектирования сигнала в системе с ММО и приемником прямого преобразования

4

Нгуен Данг Кань, Варламов О.В.

Имитационная модель для исследования работы ключевых ВЧ усилителей мощности с раздельным усилением составляющих на узкополосную нагрузку

10

Горгадзе С.Ф., Ермакова А.В.

Эффективность вариантов многостанционного доступа для сотовых сетей 5G и 6G

19

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Панков А.В., Крибель А.М., Лаута О.С., Васильев Н.А.

Метод по совершенствованию информационно-аналитической работы на основе комплексирования результатов распознавания состояний объектов контроля с использованием методов машинного обучения

27

Козлов С.В., Кубанков А.Н., Шабанов А.П.

Модуль принятия решений по интеллектуальной поддержке наукоемких производств

36

Перов Р.А., Лаута О.С., Крибель А.М., Федулов Ю.В.

Комплексная методика обнаружения кибератак на основе интеграции фрактального анализа и статистических методов

44

АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

Грачёв Ю.А., Соколов В.М., Мельников Н.М., Локтионов О.В.

Применение перспективного многофункционального эшелонированного воздушного комплекса на базе летательных аппаратов легче воздуха в органах внутренних дел

52



CONTENTS

RF TECHNOLOGY AND COMMUNICATION

Poborchaya N.E., Lobova E.O.

Kalman filter use analysis in signal detection procedure in system with MIMO and direct conversion receiver

4

Dang C. Nguyen D.C., Varlamov O.V.

Simulation model for studying the operation of switching mode envelope elimination and restoration RF power amplifiers for a narrow-band load

10

Gorgadze S.F., Ermakova A.V.

Efficiency of multiple access options for 5G and 6G cellular networks

19

INFORMATICS, COMPUTER ENGINEERING AND CONTROL

Pankov A.V., Kribel A.M., Lauts O.S., Vasiliev N.A.

Method for improving information and analytical work based on the integration of the results of recognition of the states of control objects using machine learning methods

27

Kozlov S.V., Kubankov A.N., Shabanov A.P.

Decision-making module for intellectual support of high-tech industries

36

Perov R.A., Lauts O.S., Kribel A.M., Fedulov Yu.V.

Complex method for detecting cyber attacks based on integration of fractal analysis and statistical methods

44

AVIATION, SPACE-ROCKET HARDWARE

Grachev Yu.A., Sokolov V.M., Melnikov N.M., Loktionov O.V.

The use of advanced multifunctional echeloned aerial complex based on lighter than air aircrafts in the work of internal affairs bodies

52

Founder:

"Media Publisher", LLC

Publisher:

DYMKOVA S.S.

Editor in chief:

LEGKOV K.E.

Editorial board:

BOBROWSKY V.I., PhD, Docent;
BORISOV V.V., PhD, Full Professor;
BUDKO P.A., PhD, Full Professor;
BUDNIKOV S.A., PhD, Docent,
 Actual Member of the Academy of Education Informatization;
VERHOVA G.V., PhD, Full Professor;
GONCHAREVSKY V.S., PhD, Full Professor, Honored Worker of Science and Technology of the Russian Federation;
KOMASHINSKIY V.I., PhD, Full Professor;
KIRPANEEV A.V., PhD, Docent;
KURNOSOV V.I., PhD, Full Professor, Academician of the International Academy of Informatization, law and order, Member of the Academy of Natural Sciences;
MOROZOV A.V., PhD, Full Professor, Actual Member of the Academy of Military Sciences;
MOSHAK N.N., PhD, Docent;
PAVLOV A.N., PhD, Full Professor;
PROROK V.Y., PhD, Full Professor;
SEMENOV S.S., PhD, Docent;
SINICYN E.A., PhD, Full Professor;
SHATRAKOV Y.G., PhD, Full Professor, Honored Worker of Science of the Russian Federation.

Address of publisher:

111024, Russia, Moscow, st. Aviamotornaya, 8, bild. 1, office 323

Address of edition:

194044, Russia, St. Petersburg, Lesnoy av., 34-36, h.1,
 Phone: +7 (911) 194-12-42.

Address of printing house:

Russia, Moscow, st. Skladochnaya, 3, h. 6

The opinions of the authors don't always coincide with the point of view of the publisher. For the content of ads, the editorial Board is not responsible. All articles and illustrations are copyright. All rights reserved. No reproduction is permitted in whole or part without the express consent of Media Publisher Joint-Stock company.

АНАЛИЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ФИЛЬТРА КАЛМАНА В ПРОЦЕДУРЕ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ СИГНАЛА В СИСТЕМЕ С МІМО И ПРИЕМНИКОМ ПРЯМОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

ПОБОРЧАЯ

Наталья Евгеньевна¹

ЛОБОВА

Елизавета Олеговна²

АННОТАЦИЯ

Введение. Наиболее простыми методами детектирования являются процедура Zero Forcing и алгоритм, синтезированный по критерию минимума СКО. Но они имеют недостаток, состоящий в обеспечении достаточно низкой помехоустойчивости приема сигналов. Так же широко используются в обработке сигналов итерационные алгоритмы, которые позволяют повысить помехоустойчивость или сократить вычислительную сложность процедуры детектирования. Одним из таких алгоритмов является линейная фильтрация Калмана, которая в задаче детектирования используется давно. При гауссовских шумах он является оптимальным по критерию минимума СКО. **Цель работы.** Рассматривается процедура детектирования сигнала квадратурной амплитудной модуляции (QAM) в системе связи с несколькими передающими и приемными антеннами (MIMO), состоящая из двух этапов: получения мягких решений с помощью алгоритма вида рекуррентной фильтрации Калмана, нахождение жестких решений по критерию минимального расстояния между векторами мягких решений и возможных информационных символов на каждой приемной антенне. Алгоритм Калмана производит оценку символов в i -ый момент времени за Z итераций. Проводится сравнение помехоустойчивости приема сигнала QAM, полученной с помощью методов Zero Forcing, минимума средней квадратической ошибки (СКО) и рекуррентной процедуры Калмана. Обработка сигнала происходит в условиях канала с релеевскими замираниями и доплеровским расширением спектра. Рассматриваются случаи, когда матрица канала известна точно и, когда произведена ее оценка методом наименьших квадратов (МНК) с использованием полиномиальной аппроксимации первого порядка для элементов канальной матрицы. Матрица канала учитывает не только искажения сигнала за счет среды распространения, но и искажения, полученные в приемнике прямого преобразования, такие как амплитудный и фазовый дисбаланс между квадратурами сигнала, сдвиг частоты, возникающий из-за не идеальности процедуры демодуляции, а также дрейф постоянных составляющих. **Результат.** Осуществлен анализ вычислительной сложности детектора, основанного на алгоритме Калмана.

Сведения об авторах:

¹ доцент, д.т.н., Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия, n.poborchaya@mail.ru

² с.н.с, к.т.н., Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия, lizabeth2@mail.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: система с MIMO, приемник прямого преобразования, алгоритм Калмана, параметр регуляризации, детектирование сигнала.

Для цитирования: Поборчая Н.Е., Лобова Е.О. Анализ использования фильтра Калмана в процедуре детектирования сигнала в системе с MIMO и приемником прямого преобразования // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2022. Т. 14. № 2. С. 4-9. doi: 10.36724/2409-5419-2022-14-2-4-9

Введение

Наиболее простыми методами детектирования являются процедура Zero Forcing и алгоритм, синтезированный по критерию минимума СКО. Но они имеют недостаток, состоящий в обеспечении достаточно низкой помехоустойчивости приема сигналов [1]. Так же широко используются в обработке сигналов итерационные алгоритмы, которые позволяют повысить помехоустойчивость или сократить вычислительную сложность процедуры детектирования [2-7]. Одним из таких алгоритмов является линейная фильтрация Калмана, которая в задаче детектирования используется давно [2, 8]. При гауссовских шумах он является оптимальным по критерию минимума СКО.

Оценивание информационных символов происходит во временной области в течении длительности T одного символа.

Номер итерации l – дискретное время: $l = 1, 2, \dots, n_l$, $n_l = \frac{T}{\Delta t}$,

Δt – интервал дискретизации принимаемого сигнала. Если значение T мало, то количества итераций n_l может не хватить для сходимости алгоритма. Поэтому в данной работе предлагается использовать рекуррентную процедуру вида фильтра Калмана, работающую по наблюдаемому процессу в момент времени i ($i = 1, 2, \dots, n$) за L итераций ($s = 1, 2, \dots, L$). В этом случае интервал дискретизации равен $\Delta t = T$, а n – количество детектируемых символов. Целью исследования является анализ помехоустойчивости приема сигнала QAM при использовании алгоритма Калмана в условиях точно известного канала связи и при оценивании матрицы канала процедурой, описанной в [9,11], а также оценка целесообразности его использования.

Постановка задачи

Модель квадратур сигнала прошедшего тракт приемника прямого преобразования в системе с ММО с N передающими и приемными антеннами имеет вид:

$$\mathbf{Y}_{ci} = \mathbf{H}_{ci} \boldsymbol{\Theta}_i + \mathbf{B}_{ci} + \bar{\boldsymbol{\mu}}_{ci}, \quad \mathbf{Y}_{si} = \mathbf{H}_{si} \boldsymbol{\Theta}_i + \mathbf{B}_{si} + \bar{\boldsymbol{\mu}}_{si}, \quad (1)$$

где $\mathbf{Y}_{ci} \in \mathbb{R}^N$, $\mathbf{Y}_{si} \in \mathbb{R}^N$, $\boldsymbol{\Theta}_i \in \mathbb{R}^{2N}$, – вектор информационных символов M-QAM сигнала или символов тестовой последовательности с элементами I_{ki}, J_{ki} , $k = 1, \dots, N$ – номер передающей антенны, $\mathbf{B}_{ci} \in \mathbb{R}^N$, $\mathbf{B}_{si} \in \mathbb{R}^N$ – векторы медленно меняющихся постоянных составляющих, $\bar{\boldsymbol{\mu}}_{ci} \in \mathbb{R}^N$, $\bar{\boldsymbol{\mu}}_{si} \in \mathbb{R}^N$ – шум с неизвестным законом распределения, с нулевым вектором средних значений и ковариационной матрицей $\sigma_{\mu}^2 \mathbf{I}_{N \times N}$, $\mathbf{I}_{N \times N}$ – единичная матрица размером $N \times N$, $\mathbf{H}_{ci} = (\mathbf{H}_{1c}(i) \quad -\mathbf{H}_{1s}(i))_{N \times 2N}$, $\mathbf{H}_{si} = (\mathbf{H}_{2s}(i) \quad \mathbf{H}_{2c}(i))_{N \times 2N}$ – квадратурные каналные матрицы с элементами $H_{1c,qk}(i)$, $H_{1s,qk}(i)$, $H_{2c,qk}(i)$, $H_{2s,qk}(i)$:

$$H_{1c,qk}(i) = h_{c,qk}(i) \cos(2\pi\Delta f T i + \varphi_{qi}) - h_{s,qk}(i) \sin(2\pi\Delta f T i + \varphi_{qi}),$$

$$H_{1s,qk}(i) = h_{c,qk}(i) \sin(2\pi\Delta f T i + \varphi_{qi}) + h_{s,qk}(i) \cos(2\pi\Delta f T i + \varphi_{qi}),$$

$$H_{2c,qk}(i) = \gamma_q (h_{c,qk}(i) \cos(2\pi\Delta f T i + \varphi_{qi} + \Delta\varphi_q) - h_{s,qk}(i) \sin(2\pi\Delta f T i + \varphi_{qi} + \Delta\varphi_q)),$$

$$H_{2s,qk}(i) = \gamma_q (h_{c,qk}(i) \sin(2\pi\Delta f T i + \varphi_{qi} + \Delta\varphi_q) + h_{s,qk}(i) \cos(2\pi\Delta f T i + \varphi_{qi} + \Delta\varphi_q)),$$

q – номер приемной антенны, $q = 1, 2, \dots, N$, $h_{c,qk}(i)$, $h_{s,qk}(i)$ – множители канала, формируемые с помощью модели Джейкса [2], которая представляет собой сумму квазигармоник, учитывающих частоту Доплера F_D , γ_q , $\Delta\varphi_q$ – амплитудный и фазовый дисбаланс соответственно, φ_{qi} – фаза, определяемая как $\varphi_{qi} = \varphi_{q0} + \zeta_{qi}$, φ_{q0} – начальная случайная фаза сигнала, ζ_{qi} – фазовый шум, который формируется моделью скользящего среднего 2-го порядка, Δf – сдвиг частоты, который остался после процедуры демодуляции (снятия несущей).

Требуется для рассматриваемой модели сигнала создать алгоритм получения мягких решений $\hat{\boldsymbol{\Theta}}_i$ в классе линейных рекуррентных процедур в условиях априорной неопределенности относительно законов распределения шумов и сравнить его по помехоустойчивости с детекторами Zero Forcing и минимума СКО.

В статье рассматривается сигнал с модуляцией QAM, как наиболее широко используемый совместно с технологиями многочастотной передачи сигналов OFDM и FBMC (в формате OQAM) [12]-[17].

Решение задачи

Модель (1) можно переписать в следующем виде:

$$\mathbf{Y}_i = \mathbf{H}_i \boldsymbol{\Theta}_i + \mathbf{B}_i + \boldsymbol{\mu}_i, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (2)$$

где $\mathbf{Y}_i = \begin{pmatrix} \mathbf{Y}_{ci} \\ \mathbf{Y}_{si} \end{pmatrix}_{2N \times 1}$, $\mathbf{H}_i = \begin{pmatrix} \mathbf{H}_{ci} \\ \mathbf{H}_{si} \end{pmatrix}_{2N \times 2N}$, $\mathbf{B}_i = \begin{pmatrix} \mathbf{B}_{ci} \\ \mathbf{B}_{si} \end{pmatrix}_{2N \times 1}$, $\boldsymbol{\mu}_i = \begin{pmatrix} \bar{\boldsymbol{\mu}}_{ci} \\ \bar{\boldsymbol{\mu}}_{si} \end{pmatrix}_{2N \times 1}$ – шум с нулевым вектором средних значений и ковариационной матрицей $\mathbf{Q} = \sigma_{\mu}^2 \mathbf{I}_{2N \times 2N}$, $\mathbf{I}_{2N \times 2N}$ – единичная матрица размером $2N \times 2N$.

Для оцениваемого вектора информационных символов в момент времени i создадим модель в виде авторегрессии первого порядка, зависящей от номера итерации s :

$$\boldsymbol{\Theta}_i(s) = \boldsymbol{\Theta}_i(s-1) + \zeta(s), \quad (3)$$

где $\zeta(s) \in \mathbb{R}^{2N}$ – шум динамической системы с нулевым средним значением и ковариационной матрицей $\sigma_{\zeta}^2 \mathbf{I}_{2N \times 2N}$, $\sigma_{\zeta}^2 \rightarrow 0$.

Оценку $\hat{\boldsymbol{\Theta}}_i(s)$, используя (2), (3), будем искать модифицированным методом наименьших квадратов в виде функционала Тихонова [18, 19]:

$$\|\mathbf{Y}_i - \mathbf{B}_i - \mathbf{H}_i \boldsymbol{\Theta}_i(s)\|_{\mathbf{Q}^{-1}}^2 + \|\boldsymbol{\Theta}_i(s) - \hat{\boldsymbol{\Theta}}_i(s-1)\|_{\mathbf{P}_s^{-1}}^2 = \min_{\boldsymbol{\Theta}_i(s)}.$$

Здесь $\|\cdot\|$ – евклидова норма с весовыми матрицами $\mathbf{Q}^{-1}, \mathbf{P}_s^{-1}$:

$$\|\mathbf{Y}_i - \mathbf{B}_i - \mathbf{H}_i \boldsymbol{\Theta}_i(s)\|_{\mathbf{Q}^{-1}}^2 = (\mathbf{Y}_i - \mathbf{B}_i - \mathbf{H}_i \boldsymbol{\Theta}_i(s); \mathbf{Q}^{-1}(\mathbf{Y}_i - \mathbf{B}_i - \mathbf{H}_i \boldsymbol{\Theta}_i(s))),$$

$$\|\boldsymbol{\Theta}_i(s) - \hat{\boldsymbol{\Theta}}_i(s-1)\|_{\mathbf{P}_s^{-1}}^2 = (\boldsymbol{\Theta}_i(s) - \hat{\boldsymbol{\Theta}}_i(s-1); \mathbf{P}_s^{-1}(\boldsymbol{\Theta}_i(s) - \hat{\boldsymbol{\Theta}}_i(s-1))),$$

$(\cdot; \cdot)$ – скалярное произведение. Тогда выражение для оценок имеет вид:

$$\hat{\boldsymbol{\Theta}}_i(s) = \hat{\boldsymbol{\Theta}}_i(s-1) + \mathbf{K}(s)(\mathbf{Y}_i - \mathbf{B}_i - \mathbf{H}_i \hat{\boldsymbol{\Theta}}_i(s-1)), \quad s = 1, 2, \dots, L \quad (4)$$

$$\mathbf{K}(s) = \mathbf{P}_s \mathbf{H}_i^T (\mathbf{H}_i \mathbf{P}_s \mathbf{H}_i^T + \mathbf{Q})^{-1}, \quad \mathbf{P}_s = \mathbf{G}_{s-1} + \sigma_\zeta^2 \mathbf{I}_{2N \times 2N},$$

$$\mathbf{G}_s = \mathbf{P}_s - \mathbf{K}(s) \mathbf{H}_i \mathbf{P}_s, \quad (5)$$

начальные условия: $\mathbf{G}_0 = \sigma_\mu^2 \mathbf{I}_{2N \times 2N}$, $\hat{\boldsymbol{\Theta}}_i(0) = \mathbf{0}_{2N \times 1}$.

Процедура оценивания (4), (5) при гауссовских шумах совпадает с алгоритмом фильтра Калмана. Дисперсия шума динамической системы σ_ζ^2 является параметром регуляризации, от которого зависит точность оценивания и скорость сходимости алгоритма.

Моделирование

Проведен анализ помехоустойчивости приема сигнала 4-QAM (в системе без кодирования) с помощью вычислительного эксперимента при следующих данных: количество передающих и приемных антенн $N=2; 4; 8$, СКО фазового шума – один градус, $(F_D + \Delta f)T \approx 10^{-3}$, элементы векторов постоянных составляющих $\mathbf{B}_{ci}, \mathbf{B}_{si}$, амплитудный дисбаланс γ_q , фазовый дисбаланс $\Delta\varphi_q$ и начальная случайная фаза φ_{q0} формировались как равномерно распределенные случайные величины на интервале $[0; 2]$, $[0.5; 1]$, $[-\frac{\pi}{18}; \frac{\pi}{18}]$ и $[-\pi; \pi]$ соответственно.

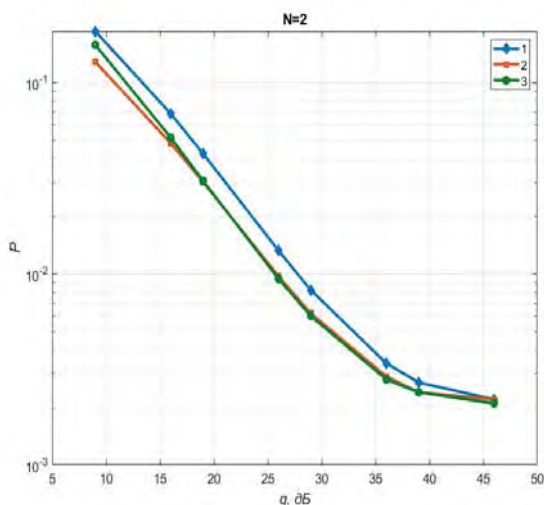
Сравнивались алгоритмы получения мягких решений Zero Forcing, минимума СКО, приведенными в таблице 1 и рекуррентная процедура Калмана (4), (5) в условиях точно известных параметров канала связи (кроме фазового шума) и при их оценке алгоритмом из [10], основанном на полиномиальной аппроксимации первого порядка множителей канала и линейном МНК. Длина информационной последовательности $n = 5600$ символов, шумы гауссовские, количество реализаций – 100.

Таблица 1

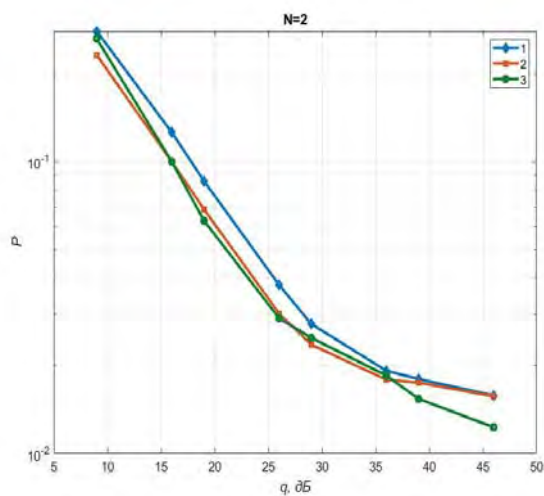
Алгоритмы нахождения мягких решений методом Zero Forcing и минимума СКО

Метод	Алгоритм
Zero Forcing	$\hat{\boldsymbol{\Theta}}_i = \mathbf{H}_i^{-1}(\mathbf{Y}_i - \mathbf{B}_i)$
минимума СКО	$\hat{\boldsymbol{\Theta}}_i = (\mathbf{H}_i^T \mathbf{H}_i + \sigma_\mu^2 \mathbf{I}_{2N \times 2N})^{-1} \mathbf{H}_i^T (\mathbf{Y}_i - \mathbf{B}_i)$

На рисунках 1, 2 и 3 показаны зависимости экспериментальной вероятности ошибки на символ при приеме сигнала 4-QAM от отношения сигнал/шум на бит при количестве передающих и приемных антенн $N=2; 4; 8$ соответственно.



а)

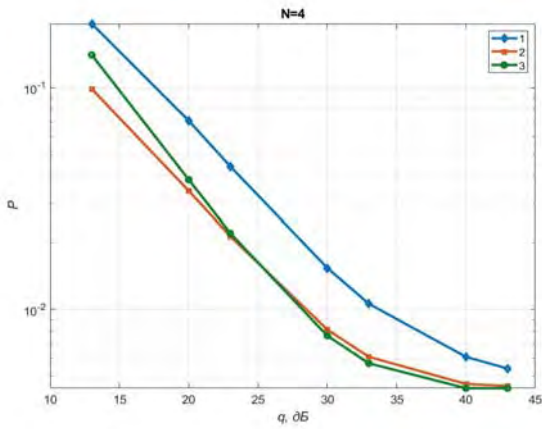


б)

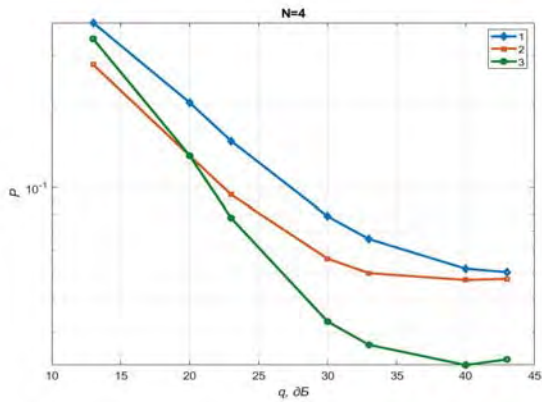
Рис. 1. Зависимость экспериментальной вероятности ошибки на символ приема сигнала 4-QAM от отношения сигнал/шум на бит для системы с MIMO при $N=2$ для точно известного канала кроме фазового шума (а) и для канала, оцененного алгоритмом из [10]: длина тестовой последовательности – 50 символов, длина интервала экстраполяции – 40 символов, количество сеансов передачи тестового сигнала – 20 (б)

1 – детектор Zero Forcing; 2 – детектор минимума СКО;
3 – детектор (4), (5) при $L = 100$ и $\sigma_\zeta^2 = 10^{-4}$ (а), $\sigma_\zeta^2 = 10^{-6}$ (б)

Из рисунков 1-3 видно, что при точно известном канале использование алгоритма Калмана дает энергетический выигрыш начиная с $N=8$ и составляет, например, от 1 до 4 дБ при отношении сигнал/шум $q=24-36$ дБ относительно детектора, работающего по критерию минимума СКО. Если параметры канала оцениваются алгоритмом из [10], то указанный выигрыш отмечается уже при $N=4$.



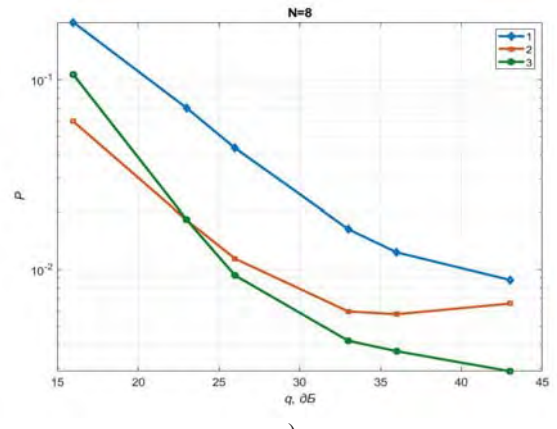
а)



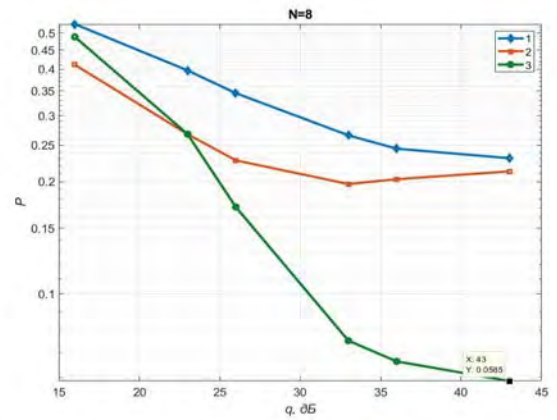
б)

Рис. 2. Зависимость экспериментальной вероятности ошибки на символ приема сигнала 4-QAM от отношения сигнал/шум на бит для системы с MIMO при $N=4$ для точно известного канала кроме фазового шума (а) и для канала, оцененного алгоритмом из [10]: длина тестовой последовательности – 50 символов, длина интервала экстраполяции – 40 символов, количество сеансов передачи тестового сигнала – 20 (б)

1 – детектор Zero Forcing; 2 – детектор минимума СКО;
3 – детектор (4), (5) при $L = 100$ и $\sigma_z^2 = 10^{-4}$ (а), $\sigma_z^2 = 10^{-6}$ (б)



а)



б)

Рис. 3. Зависимость экспериментальной вероятности ошибки на символ приема сигнала 4-QAM от отношения сигнал/шум на бит для системы с MIMO при $N=8$ для точно известного канала кроме фазового шума (а) и для канала, оцененного алгоритмом из [10]: длина тестовой последовательности – 100 символов, длина интервала экстраполяции – 10 символов, количество сеансов передачи тестового сигнала – 10 (б)

1 – детектор Zero Forcing; 2 – детектор минимума СКО;
3 – детектор (4), (5) при $L = 100$ и $\sigma_z^2 = 10^{-6}$ (а), $\sigma_z^2 = 0$ (б)

На рисунке 4 показаны экспериментальные кривые помехоустойчивости приема сигнала 4-QAM при использовании в процедуре детектирования алгоритма Калмана (4), (5) при $\sigma_z^2 = 0$ с разным количеством итераций в системе с $N=8$ и оценкой параметров канала, производимой алгоритмом, описанным в [10].

Из рисунка 4 можно сделать следующий вывод: при значении параметра регуляризации в процедуре (4), (5) $\sigma_z^2 = 0$ для достижения наименьшей вероятности ошибки требуется от 30 до 50 итераций алгоритма (4), (5).

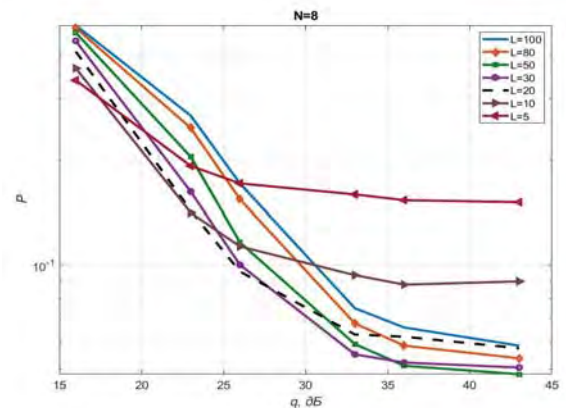


Рис. 4. Зависимость экспериментальной вероятности ошибки на символ приема сигнала 4-QAM от отношения сигнал/шум на бит при использовании в процедуре детектирования алгоритма (4), (5) с $\sigma_z^2 = 0$ при разных значениях L для системы с MIMO при $N=8$ и канала, оцененного алгоритмом из [10]

Оценка вычислительной сложности алгоритма (4), (5)

Проведен анализ количества арифметических операций, необходимых для выполнения процедуры детектирования разными алгоритмами (см. табл. 2).

После получения мягких решений $\hat{\Theta}_T = (\hat{\Theta}_{ci} \dots \hat{\Theta}_{cN} \hat{\Theta}_{si} \dots \hat{\Theta}_{sN})^T$ методами Zero Forcing, минимума СКО и Калмана (4), (5), жесткие решения определяются по критерию минимального расстояния между полученными оценками $\hat{\Theta}_{cki}, \hat{\Theta}_{ski}, k = 1, 2, \dots, N$ и возможными символами $I_{0r}, J_{0p}, r, p = 1, 2, \dots, \sqrt{M} : (\hat{\Theta}_{cki} - I_{0r})^2 + (\hat{\Theta}_{ski} - J_{0p})^2 = \min_{I_{0r}, J_{0p}}$.

Таблица 2

Вычислительная сложность алгоритмов детектирования сигнала M-QAM

Метод	Количество операций $N_{оп}$
Максимального правдоподобия (МП)	$N_{оп} \cong (8N^2 + 4N - 1)M^N$
Zero Forcing	$N_{оп} \cong 8N^3 + 8N^2 + 5MN$
Минимума СКО	$N_{оп} \cong 16N^3 + 18N^2 - N + 5MN$
Алгоритм Калмана	$N_{оп} \cong (64N^3 + 10N^2 + 5N)L + 5MN$

Из таблицы 2 следует, что если $M=4, N=8$, то вычислительная сложность для алгоритма МП приблизительно составляет 35586048 операций, для Zero Forcing – 4768, для процедуры минимума СКО – 9496 и для алгоритма Калмана при количестве итераций $L=30$ – 1003600 операций.

Заключение

Применение рекуррентной процедуры Калмана (4), (5) при детектировании сигнала M-QAM в системе с MIMO с количеством передающих и приемных антенн $N=4$ и $N=8$ позволяет получить энергетический выигрыш относительно метода Zero Forcing до 10 дБ и до 4 дБ относительно метода минимума СКО при отношении сигнал/шум 24–36 дБ.

Сложность алгоритма (4), (5) линейно зависит от количества его итераций L . Для обеспечения возможности использовать (4), (5) в процедуре детектирования необходимо уменьшить количество арифметических операций. Этого можно достигнуть, подобрав параметр регуляризации σ_ζ^2 , при котором L было бы минимальным без ощутимых потерь в помехоустойчивости приема.

Литература

1. Бакулин М.Г., Варукина Л.А., Крейнделлин В.Б. Технология MIMO: принципы и алгоритмы. М.: Горячая линия-Телеком, 2014. 244 с.
2. Крейнделлин В.Б. Новые методы обработки сигналов в системах беспроводной связи. СПб: Линк, 2009. 276 с.
3. Leibo Liu, Guiqiang Peng, Shaojun Wei. Massive MIMO Detection Algorithm and VLSI Architecture, Jointly published with Science Press, Beijing, China <https://doi.org/10.1007/978-981-13-6362-7>, 2019. 348 p.
4. Wang X. et al. Pilot-Assisted Channel Estimation and Signal

Detection in Uplink Multi-User MIMO Systems With Deep Learning // IEEE Access, vol.8, pp. 44936-44946, 2020.

5. Бакулин М.Г., Крейнделлин В.Б., Панкратов Д.Ю., Степанова А.Г. Итерационный метод демодуляции massive MIMO при негауссовской аппроксимации // Информационные процессы. 2021. Т. 21. № 3. С. 137-148.

6. Bakulin M., Kreyndelin V., Rog A., Petrov D., Melnik S. A new algorithm of iterative mimo detection and decoding using linear detector and enhanced turbo procedure in iterative loop // Conference of Open Innovations Association, FRUCT. 2019. № 24. С. 40-46.

7. Панкратов Д.Ю., Степанова А.Г. Вычислительная сложность алгоритмов демодуляции систем MIMO с большим числом антенн // DSPA: вопросы применения цифровой обработки сигналов. 2021. №1. С. 11-20.

8. Teng Joon Lim, Lars K. Rasmussen and Hiroki Sugimoto. An asynchronous multiuser CDMA detector, based on the Kalman filter // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 1998. Vol. 16, no. 9, pp. 1711-1722.

9. Poborchaya N.E. DC-offset and IQ-imbalance estimation in the MIMO system // IEEE Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications, SYNCHROINFO 2017, 3-4 July, Russia, Kazan.

10. Maksimov S.Yu., Poborchaya N.E. Estimation of a channel factors and signal distortions in the MIMO system with a direct transform receiver under the conditions of rayleigh fading and doppler frequency dispersion // 2020 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO), 1-3 July 2020, Svetlogorsk, Russia. DOI: 10.1109/SYNCHROINFO49631.2020.9166116.

11. Poborchaya N.E. Synthesis of the joint estimation algorithm of the OFDM signal distortions based on polynomial approximation // 2018 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO), 4-5 July 2018, Minsk, Belarus.

12. Lipatkin V.I., Priputin V.S., Lobova E.O. Application of Digital Filter Bank for Radio Monitoring // 2019 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, SOSG 2019, 2019, 8706812.

13. Lipatkin V.I., Lobova E.O., Kandaurov N.A. Wideband Signals Dispersion Distortions Optimum Tracking Compensator Based on Digital Filter Banks Using Farrow Filters // 2020 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, 2020, 9078656.

14. Varlam v V.O., Lobov E.M., Lobova E.O., Liberman E.A. Research of the Hybrid Filter Bank Frequency Equalizer Transfer Function Coefficients Estimation Quality // 2021 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, Conference Proceedings, 2021, 9416060.

15. Lobov E.M., Shubin D.N. A Narrow-Band Interference Compensation Device Based on a Digital Filter Bank for Broadband Low-Energy HF Radio Lines // 2019 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, SOSG 2019, 2019, 8706791

16. Lobov E.M., Varlamov V.O., Sokolov K.Y. Methods for Increasing the Computational Efficiency of the Algorithm for Calculating the Compensator for Non-Uniformity of the Frequency Response of Analog Filters in a Hybrid Filter Bank // 2020 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, 2020, 9078558.

17. Lobov E.M., Varlamov V.O., Sattarova A.I. Digital compensation for uneven frequency response of analog filters from the hybrid filter bank // 2019 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications, SYNCHROINFO 2019, 2019, 8814267.

18. Тухонов А.Н., Леонов А.С., Ягола А.Г. Нелинейные некорректные задачи. М.: Наука Физматлит, 1995. 312 с.

19. Poborchaya N.E. Synthesis of an Algorithm for Estimating Signal Distortions in a Direct Conversion Receiver Based on Combining a Regularizing Procedure and a Nonlinear Filtering Method // J. Commun. Technol. Electron. No. 66, pp. 964-970. 2021. <https://doi.org/10.1134/S1064226921080064>



KALMAN FILTER USE ANALYSIS IN SIGNAL DETECTION PROCEDURE IN SYSTEM WITH MIMO AND DIRECT CONVERSION RECEIVER

NATALYA E. POBORCHAYA

Moscow, Russia, n.poborchaya@mail.ru

ELIZAVETA O. LOBOVA

Moscow, Russia, lizabeth2@mail.ru

KEYWORDS: MIMO system, direct transform receiver, Kalman algorithm, regularization parameter, signal detection.

ABSTRACT

Introduction: The procedure for detecting a quadrature amplitude modulation (QAM) signal in a communication system with multiple transmitting and receiving antennas (MIMO) is considered, which consists of two stages: obtaining soft solutions using the recurrent Kalman filtering algorithm, finding hard solutions by criterion of minimum distance between soft decision vectors and possible information symbols on each receiving antenna. The Kalman algorithm evaluates symbols at i -th time point in iterations. A comparison is made of noise immunity of QAM signal reception obtained using the Zero Forcing methods, the minimum mean square error (RMS), and recurrent Kalman procedure. Signal processing takes place under channel conditions with Rayleigh fading and Doppler spread spectrum. Cases are considered when the channel matrix is known exactly and when it is estimated by least squares method (LSM) using a first-order polynomial approximation for channel matrix elements. The channel matrix takes into account not only signal distortions due to the propagation medium, but also distortions obtained in the direct conversion receiver, such as amplitude and phase imbalance between signal quadratures, frequency shift due to non-ideal demodulation procedure, as well as DC drift. **Result:** The computational complexity of the detector based on Kalman algorithm is analyzed.

REFERENCES

1. M.G. Bakulin, L.A. Varukina, V.B. Kreindelin. (2014). MIMO technology: principles and algorithms. Moscow: Hotline-Telecom. 244 p.
2. V. B. Kreindelin. New methods of signal processing in wireless communication systems. St. Petersburg: Link, 2009. 276 p.
3. Leibo Liu, Guiqiang Peng, Shaojun Wei. (2019). Massive MIMO Detection Algorithm and VLSI Architecture, Jointly published with Science Press, Beijing, China <https://doi.org/10.1007/978-981-13-6362-7>. 348 p.
4. X. Wang et al. (2020). Pilot-Assisted Channel Estimation and Signal Detection in Uplink Multi-User MIMO Systems With Deep Learning. *IEEE Access*, vol. 8, pp. 44936-44946.
5. M. G. Bakulin, V. B. Kreindelin, D. Yu. Pankratov, A. G. Stepanova. (2021). Massive MIMO iterative demodulation method with non-Gaussian approximation. *Information processes*. Vol. 21. No. 3, pp. 137-148.
6. M. Bakulin, V. Kreindelin, A. Rog, D. Petrov, S. Melnik. (2019). A new algorithm of iterative mimo detection and decoding using linear detector and enhanced turbo procedure in iterative loop. *Conference of Open Innovations Association, FRUCT*. No. 24, pp. 40-46.
7. D. Yu. Pankratov, A. G. Stepanova. (2021). Computational complexity of demodulation algorithms for MIMO systems with a large number of antennas. *DSPA:*

issues of digital signal processing. No. 1, pp. 11-20.

8. Teng Joon Lim, Lars K. (1998). Rasmussen and Hiroki Sugimoto. An asynchronous multiuser CDMA detector, based on the Kalman filter. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. Vol.16, No. 9, pp. 1711-1722.

9. N. E. Poborchaya. (2017). "DC-offset and IQ-imbalance estimation in the MIMO system". *IEEE Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications, SYNCHROINFO*. 3-4 July, Russia, Kazan.

10. S. Yu. Maksimov, N.E. Poborchaya. (2020). Estimation of a channel factors and signal distortions in the MIMO system with a direct transform receiver under the conditions of rayleigh fading and doppler frequency dispersion. *2020 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*, 1-3 July 2020, Svetlogorsk, Russia. DOI: 10.1109/SYNCHROINFO49631.2020.9166116.

11. N. E. Poborchaya. (2018). Synthesis of the joint estimation algorithm of the OFDM signal distortions based on polynomial approximation. *2018 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*, 4-5 July 2018, Minsk, Belarus.

12. V. I. Lipatkin, V. S. Priputin, E. O. Lobova. (2019). "Application of Digital Filter Bank for Radio Monitoring," *2019 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, SOSG 2019*, 8706812.

13. V. I. Lipatkin, E. O. Lobova, N. A. Kandaurov. (2020). "Wideband Signals Dispersion Distortions Optimum Tracking Compensator Based on Digital Filter Banks Using Farrow Filters," *2020 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*, 9078656

14. V. O. Varlamov, E. M. Lobov, E. O. Lobova, E. A. Liberman, (2021). "Research of the Hybrid Filter Bank Frequency Equalizer Transfer Function Coefficients Estimation Quality," *2021 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, Conference Proceedings*, 9416060.

15. E. M. Lobov, D. N. Shubin, (2019). "A Narrow-Band Interference Compensation Device Based on a Digital Filter Bank for Broadband Low-Energy HF Radio Lines," *2019 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, SOSG 2019*, 8706791.

16. E. M. Lobov, V. O. Varlamov, K. Y. Sokolov, (2020). "Methods for Increasing the Computational Efficiency of the Algorithm for Calculating the Compensator for Non-Uniformity of the Frequency Response of Analog Filters in a Hybrid Filter Bank," *2020 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*, 9078558.

17. E. M. Lobov, V. O. Varlamov, A. I. Sattarova, (2019). "Digital compensation for uneven frequency response of analog filters from the hybrid filter bank," *2019 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications, SYNCHROINFO 2019*, 8814267.

18. A.N. Tikhonov, A.S. Leonov, A.G. Yagola. (1995). Nonlinear ill-posed problems. Moscow: Nauka Fizmatlit. 312 p.

19. N. E. Poborchaya, (2021). "Synthesis of an Algorithm for Estimating Signal Distortions in a Direct Conversion Receiver Based on Combining a Regularizing Procedure and a Nonlinear Filtering Method," *J. Commun. Technol. electron*. No. 66, pp. 964-970. <https://doi.org/10.1134/S1064226921080064>

INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Natalya E. Poborchaya, Associate Professor, Doctor of Technical Sciences, MTUCI, Moscow, Russia

Elizaveta O. Lobova, senior researcher, Ph.D., MTUCI, Moscow, Russia

For citation: Poborchaya N.E., Lobova E.O. Kalman filter use analysis in signal detection procedure in system with MIMO and direct conversion receiver. *H&ES Reserch*. 2022. Vol. 14. No 2. P. 4-9. doi: 10.36724/2409-5419-2021-14-2-4-9 (In Rus)

doi: 10.36724/2409-5419-2022-14-2-10-18

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ КЛЮЧЕВЫХ ВЧ УСИЛИТЕЛЕЙ МОЩНОСТИ С РАЗДЕЛЬНЫМ УСИЛЕНИЕМ СОСТАВЛЯЮЩИХ НА УЗКОПОЛОСНУЮ НАГРУЗКУ

НГУЕН ДАНГ КАНЬ¹

ВАРЛАМОВ
Олег Витальевич²

АННОТАЦИЯ

Введение: Высокоэффективные ключевые ВЧ усилители мощности с раздельным усилением составляющих (УМРС) наиболее перспективны из ряда "синтетических" методов усиления мощности для широкого круга разнообразных приложений. Однако, при их работе на рассогласованную узкополосную нагрузку, например, электрически короткую антенну, возникают дополнительные внеполосные излучения, ограничивающие область применения УМРС. **Цель работы** заключается в разработке имитационной модели для исследования работы ключевых ВЧ усилителей мощности с раздельным усилением составляющих на узкополосную нагрузку. **Обоснованы** выбор транзитного метода анализа и использование свободно распространяемой среды моделирования Micro-Cup 12. Предложен ряд оригинальных решений для сокращения времени вычислений. **Приведено** описание разработанной модели, позволяющей исследовать особенности работы УМРС на узкополосную антенну на фрагменте реального сигнала с амплитудно-фазовой модуляцией. В качестве примера используется сигнал OFDM цифрового радиовещания стандарта DRM с полосой частот 10 кГц. Исследования, проводимые с помощью данной модели, могут пропорционально масштабироваться для любой полосы частот и позволят в дальнейшем разработать технические требования к характеристикам узлов УМРС. Приведены **результаты** некоторых расчетов, показывающих адекватность разработанной модели. **Практическая значимость:** использование данной модели для последующего поиска решений по обеспечению возможности работы УМРС на более узкополосную нагрузку расширит области применения этих высокоэффективных усилителей мощности.

Сведения об авторах:

¹ аспирант, Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия, nguyendangcanh1319951@gmail.com

² д.т.н., доцент, профессор кафедры "Радиооборудование и схемотехника", Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия, vov@mtuci.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3996-9156>
Scopus Author ID: 6602830358
ResearcherID: N-3076-2013

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: высокоэффективный ВЧ усилитель мощности, ключевой усилитель, класс D, усилитель мощности с раздельным усилением составляющих, узкополосная нагрузка, имитационная модель.

Для цитирования: Нгуен Данг Кань, Варламов О.В. Имитационная модель для исследования работы ключевых ВЧ усилителей мощности с раздельным усилением составляющих на узкополосную нагрузку // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2022. Т. 14. № 2. С. 10-18. doi: 10.36724/2409-5419-2022-14-2-10-18

1. Введение

Высокоэффективные ключевые ВЧ усилители мощности с раздельным усилением составляющих (УМРС, или метод Кана [1]) наиболее перспективны из ряда "синтетических" методов усиления мощности [2-6] для широкого круга разнообразных приложений. Их предпочтительный диапазон применимости простирается от мощных радиовещательных систем диапазонов НЧ и СЧ [7, 8] до маломощных приложений интернета вещей [28-35] в сетях 5G [9-12].

В первом случае использование оборудования с более высоким КПД позволяет существенно снизить операционные расходы (оплата счетов за электроэнергию). Во втором случае их применение позволяет обеспечить требуемый срок функционирования устройства, который должен составлять не менее 10 лет без замены батарей. В обоих случаях антенна, являющаяся нагрузкой для рассматриваемого УМРС, может быть электрически короткой (относительно длины волны) и, соответственно, узкополосной [13].

В предыдущих широко известных работах рассмотрено влияние на параметры УМРС нелинейности амплитудной характеристики АМ/АМ, неравномерности фазоамплитудной характеристики АМ/РМ, ограничения полосы частот огибающей, относительной задержки составляющих и смещения "нуля" в сигнале огибающей [14].

Работа собственно ключевых усилителей мощности на рассогласованную нагрузку рассматривалась ранее в [15]. Некоторые экспериментальные исследования работы УМРС при широкополосном рассогласовании нагрузки были проведены в [16]. Физическое объяснение процессов, происходящих в цепи "узкополосная антенна - выходной каскад УМ" в достаточно общем виде рассмотрено в [17]. Однако УМРС представляет собой сложную структуру, содержащую помимо собственно ключевого ВЧ усилителя еще и ШИМ модулятор, и его ФНЧ с неравномерностью ГВЗ в полосе частот огибающей. Поэтому разработка модели УМРС, позволяющая исследовать его характеристики при работе на узкополосную нагрузку, является актуальной.

Статья организована следующим образом. Во втором разделе обосновывается выбор метода анализа и программного обеспечения. В третьем разделе приведено описание разработанной модели. В четвертом разделе приведены результаты некоторых расчетов, показывающих адекватность разработанной модели. В пятом разделе приводятся выводы.

2. Выбор метода анализа и программного обеспечения

В современном мире, насыщенном множеством различных радиосредств, в реальных условиях эксплуатации цепь нагрузки передатчика уже нельзя считать пассивной. Действительно, при наличии в непосредственной близости другого радиопередающего устройства, его сигнал, наводясь на антенну рассматриваемого передатчика, проникает в выходной каскад, что вызывает обратные интермодуляционные искажения [18, 19].

При работе на электрически короткую узкополосную антенну, как показано в [17], при быстром изменении передаваемого сигнала входное сопротивление антенны может

стать отрицательным. Это значит, что в это время антенна отправляет запасенную в ней энергию обратно в передатчик. Поэтому в обоих рассмотренных выше случаях антенну нельзя считать пассивной цепью, а следует рассматривать ее в общем случае как нелинейно-параметрическую. Такая цепь нагрузки изменяет сигнал огибающей в УМРС.

Для проведения анализа работы УМРС на данный вид нагрузки необходимо учитывать совместное влияние радиочастотного тракта и канала огибающей. При этом надо предполагать, что в общем случае тракт огибающей может быть существенно усложнен по сравнению с классическим вариантом [1], и использовать, например, многофазную ШИМ [20] или дополнительную сигма-дельта модуляцию в ШИМ усилителе [21].

В связи с комплексной структурой усилителя и вариативностью поведения антенной цепи, моделирование работы УМРС на такую антенну связано с большим объемом вычислений. Спектральный состав одновременно моделируемых сигналов простирается от постоянной составляющей до сотен Мегагерц в сигнале огибающей, спектр предельно ограниченной ФМ составляющей рабочей радиочастоты теоретически бесконечен, а спектр ключевого радиочастотного УМ простирается на несколько гармоник рабочей частоты. По этим причинам использование быстро работающего метода гармонического баланса [36] не представляется целесообразным. Также не позволяет решить задачу метод ко-симуляции огибающей – из-за работы тракта огибающей в ключевом режиме с ШИМ.

Таким образом, необходимо использовать транзитный анализ, требующий больших вычислительных ресурсов. Для сокращения времени вычислений предложен ряд оригинальных решений, которые будут рассмотрены в следующем разделе. Мы проводим моделирование структурной схемы, не связанное с использованием лицензионных моделей конкретных активных элементов от производителей. Это позволяет проводить моделирование в свободно распространяемой среде Micro-Cup 12 и не использовать такие известные лицензионные программы, как ADS или MWO.

3. Описание разработанной модели

В данном разделе проводится разработка компьютерной модели, позволяющей проводить исследования работы УМРС на узкополосную антенну на фрагменте реального сигнала с амплитудно-фазовой модуляцией.

В качестве примера используется сигнал OFDM цифрового радиовещания стандарта DRM с полосой частот 10 кГц. Исследования, проводимые с помощью данной модели, могут пропорционально масштабироваться для любой полосы частот и позволят в дальнейшем разработать технические требования к характеристикам узлов УМРС.

Разработка симуляционной модели для ключевого УМРС производилась в среде схемотехнического моделирования Micro-Cup. Модель функционально состоит из трёх блоков – узкополосной антенны, усилителя с раздельным усилением составляющих модулированного сигнала (УМРС) и возбуждателя. Принципиальная схема разработанной симуляционной модели приведена на рисунке 1.

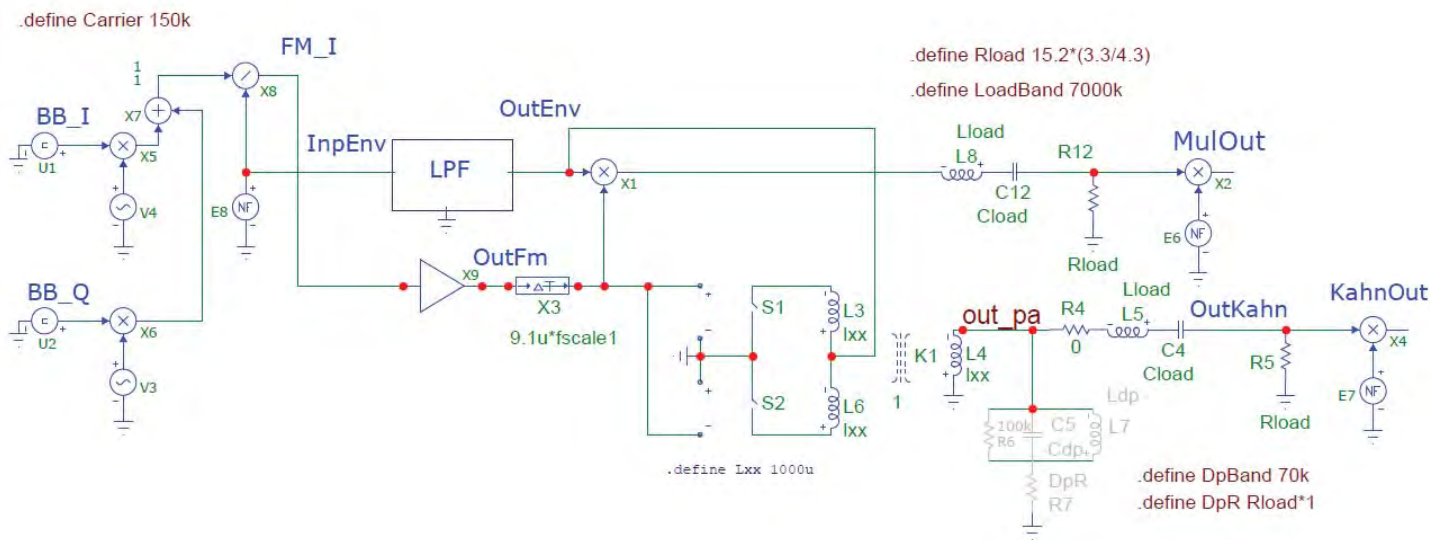


Рис. 1. Принципиальная схема модели УМРС с узкополосной нагрузкой

Для моделирования узкополосной антенны использовано её упрощенное представление в виде последовательного RLC контура (элементы C4, L5, R5). Основным ограничением такой модели является отсутствие зависимости сопротивления излучения антенны от частоты. Погрешность модели зависит от соотношения полосы передаваемого сигнала и несущей частоты и максимальна в диапазоне длинных волн.

Однако применение упрощенной модели не меняет описанный в [17] механизм возникновения нелинейных искажений передаваемого сигнала. При этом упрощенная модель обладает таким несомненным достоинством, как одномерность (варьируемый параметр – полоса пропускания, связанная с добротностью RLC контура).

Для управления параметрами антенны в модели имеются текстовые поля:

- «.define Rload 15.2*0.767», задающее сопротивление нагрузки в Омах;
- «.define LoadBand 70k», задающее полосу пропускания по уровню -3дБ.

Значения элементов контура C4, L5 пересчитываются автоматически при запуске процесса симуляции:

```
.define Qload (Carrier/LoadBand)
.define Xlc (Qload*Rload)
.define Lload (Xlc/(2*pi*Carrier))
.define Cload (1/(Xlc*2*pi*Carrier)).
```

Сопротивление нагрузки выбирается равным номинальной нагрузке фильтра тракта огибающей. Так, в приведенном примере оно равно 15,2 Ом с поправочным коэффициентом, учитывающим пересчет сопротивления нагрузки передатчика (УМРС) по первой гармонике несущей частоты в сопротивление нагрузки тракта огибающей. Поправочный коэффициент равен единице в случае приводимой к выходу УМРС резистивной нагрузки по всем гармоникам, и 0,767, в случае холостого хода по высшим гармоникам выходного ВЧ сигнала.

Помимо собственно модели узкополосной антенны, в схеме имеется модель параллельной частотно-расширительной цепи [13] – элементы C5, L7, R7. В этой модели можно устанавливать два параметра:

- «DpBand 70k» – полоса пропускания по уровню -3дБ;
- «DpR Rload*1» – сопротивление нагрузки.

Значения элементов C5, L7 рассчитываются автоматически:

```
.define Cdup 1/(rload*2*pi*loadband)
.define DPfreq carrier
.define QDP (DPfreq/DPband)
.define DPXlc (rload/QDP)
.define Ldp (DPXlc/(2*pi*DPfreq))
.define Cdp (1/(DPXlc*2*pi*DPfreq)).
```

Модель оконечного каскада ВЧ тракта УМРС состоит из усилительной ячейки с параллельным питанием, состоящей из идеальных ключей S1, S2 и идеального трансформатора L3, L4, L6. Выбор такой схемы обусловлен ее широкой распространенностью в диапазонах частот выше 3 МГц. Она также применима и для анализа традиционно используемого в передатчиках ДВ и СВ диапазонов усилительного модуля на основе Н-моста.

Как показано в [22], в случае управляющих сигналов в виде меандра, схемы с Н-мостом и параллельным питанием полностью эквивалентны. Несмотря на то, что реальные передатчики большой мощности могут содержать большое количество (десятки и сотни) усилительных ячеек, мощности которых складываются в общей нагрузке, а также различные элементы согласующих устройств [23, 24], для проведения анализа происходящих процессов достаточно рассмотрения одной ячейки. При этом данная модель обладает несколько большей скоростью симуляции, связанной с минимизацией переходных процессов.



В цепи управления ключами установлена линия задержки X3, компенсирующая запаздывание сигнала в фильтре тракта огибающей. При моделировании тракта огибающей широтно-импульсный модулятор был заменен на линейный усилитель, нагруженный на фильтр нижних частот. Данный подход позволяет довольно существенно увеличить скорость симуляции. Отсутствие в спектре сигнала на входе ФНЧ гармоник тактовой частоты ШИМ не влияет на интересные нас процессы.

Модель возбудителя должна обеспечивать формирование тестового сигнала, максимально адекватно описывающего цифровой сигнал стандарта DRM и представление его в полярном виде – т.е., в виде огибающей и фазомодулированной составляющей. Для этого в качестве тестового использовался записанный в файл фрагмент реального OFDM сигнала стандарта DRM. При тестировании модели с таким источником были получены допустимые параметры нагрузки, близкие к паспортным требованиям производителей вещательных передатчиков.

Для моделирования используется предварительно подготовленный файл с записью комплексного DRM сигнала с полосой 10 кГц на нулевой промежуточной частоте.

В связи с этим в схему добавлен квадратурный преобразователь частоты, выполненный на элементах V3, V4 – комплексно-сопряженные генераторы опорной частоты, X5, X6 – аналоговые перемножители, X7 – сумматор. Сигнал огибающей (элемент E8) рассчитывается в текстовой части модели как:

```
.define env sqrt((v(BB_I)*v(BB_I))+v(BB_Q)*v(BB_Q)).
```

Полоса формируемого сигнала определяется при создании файла с записью комплексного DRM сигнала. Параметр «.define Carrier 150k» – задает центральную частоту.

Также следует пояснить назначение аналоговых перемножителей X2 и X4. Сигналы с выходов этих перемножителей используются для расчета спектра выходного сигнала моделируемого передатчика. Дело в том, что встроенный анализатор спектра Micro-Cap имеет единственный вид весового окна – прямоугольное, что требует, для обеспечения малого уровня паразитных составляющих спектра, модели-

рования на значительном интервале времени. Поэтому в схему был введен дополнительный формирователь оконной функции, имеющей плоскую вершину и переходные области вида \sin^2 . Сигнал оконной функции рассчитывается в текстовой части модели как:

```
.define Trise 0.2
.define TWr (Tmax*Trise)
.define TW2 (Tmax-TWr)
.define WW ((PI*(1/TWr))/2)
.define Wind1 IF((T<TWr) or (T=TWr), (sin(ww*t))^2, 0)
.define Wind2 IF((T>TWr) and (T<TW2), 1, 0)
.define Wind3 IF((T=TW2) or (T>TW2), (sin(ww*(t-Tmax+(2*TWR))))^2, 0)
.define wind (Wind1+Wind2+Wind3+0.00001)
```

и подается на входы перемножителей с выходов генераторов E6, E7.

В разработанной модели передатчика (УМРС) исследуется ряд фильтров ШИМ модулятора. Для удобства работы модели фильтры размещены на отдельных страницах проекта Micro-Cap. Для их подключения к модели УМРС служат точки «InpEnv» – вход фильтра и «OutEnv» – выход фильтра. Принципиальные схемы фильтров приведены на рисунках 2-4.

В состав моделей фильтров включены резисторы, определяющие выходное сопротивление модулятора. Таким образом, можно сравнивать работу УМРС с модулятором в режиме генератора напряжения (типовая схема), либо в режиме согласования модулятора и фильтра гармоник, например, в случае использования в модуляторе обратной связи по току. Для управления фильтром в моделях имеется текстовое поле «.define LPF_band_2 64k», задающее полосу пропускания фильтра по уровню -3дБ. Введенное значение используется для вычисления нормировочного коэффициента номиналов элементов фильтра Fscale, например:

$Fscale2 = F_LPF_3 / LPF_band_2$, где F_LPF_3 – полоса пропускания фильтра при фиксированных элементах. Также коэффициент Fscale используется для корректировки компенсирующей линии задержки.

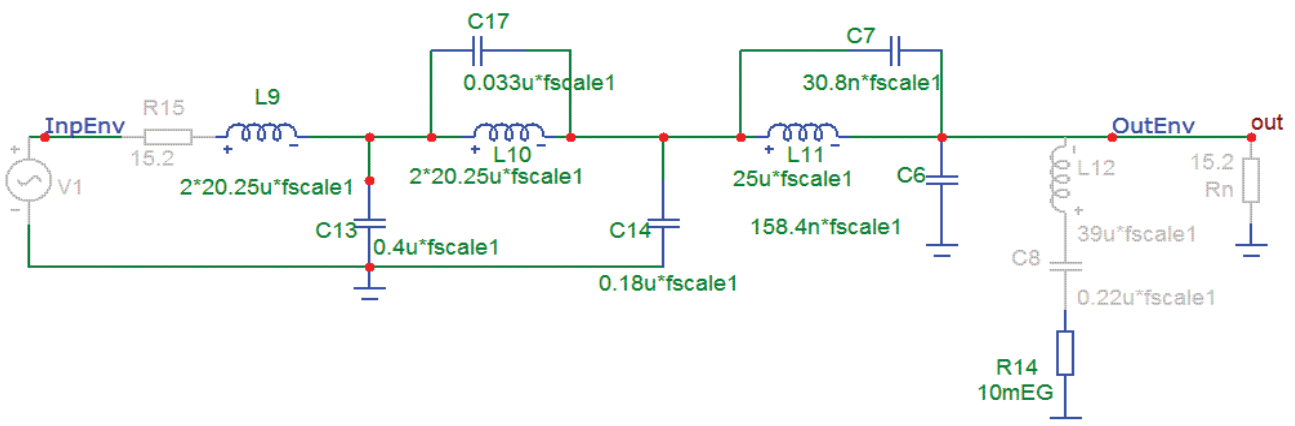


Рис. 2. Принципиальная схема ФНЧ модулятора передатчика DAX фирмы Харрис

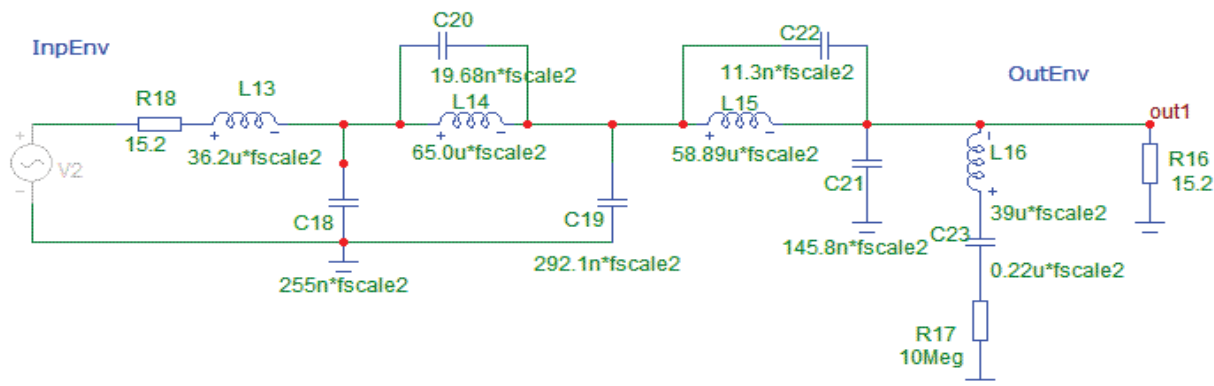


Рис. 3. Принципиальная схема ФНЧ модулятора. Стандартный фильтр Кауэра. Согласованный режим

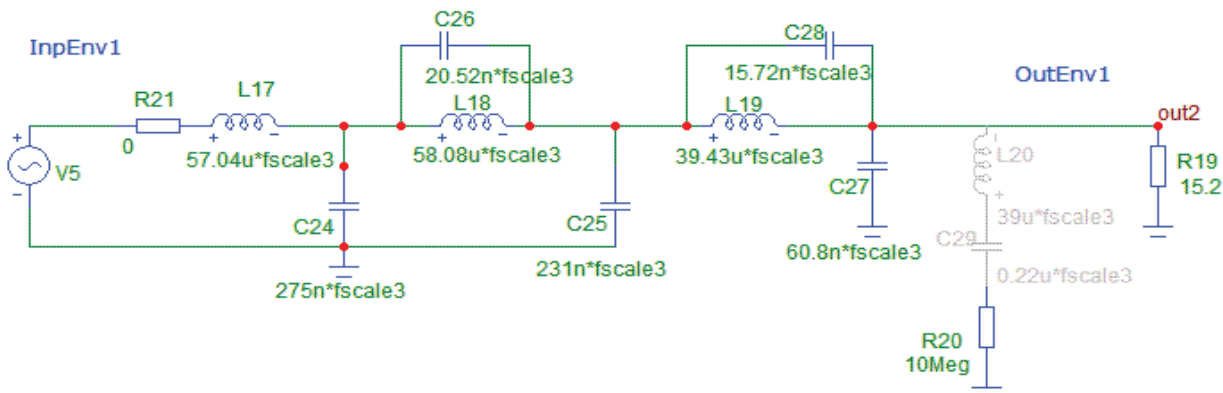


Рис. 4. Принципиальная схема ФНЧ модулятора. Стандартный фильтр Кауэра, спроектированный для работы от генератора напряжения

Далее следует отметить существенную трудность, возникающую при моделировании ключевого усилителя фазомодулированной составляющей OFDM сигнала (оконечного каскада ВЧ тракта УМРС). Как известно [25], транзитный анализ (расчет переходных процессов методом численного решения дифференциальных уравнений) в пакетах схемотехнического моделирования производится дискретно по времени. Однако фаза OFDM сигнала является непрерывной функцией от текущего времени. Поскольку полоса этого сигнала ограничена, то для его однозначного представления достаточно, чтобы частота дискретизации модели удовлетворяла критерию Котельникова. На практике применяют временной шаг моделирования, во много раз меньший периода анализируемого сигнала, и никаких проблем при этом не возникает.

Ситуация меняется, как только OFDM сигнал пропускается через предельный ограничитель, каковым является любой ключевой усилитель. Спектр предельно ограниченного сигнала становится бесконечным и неизбежно появляется неустраняемая ошибка моделирования. Прямой путь решения данной проблемы – это уменьшение временного шага моделирования до величины, при которой ошибками в расчетах можно пренебречь. Можно оценить достаточную величину шага, если рассматривать дискретизацию сигнала, как процесс квантования фазы.

Из опыта предыдущих работ известно, что ошибка квантования, соответствующая десяти двоичным разрядам, позволяет формировать сигнал, имеющий значительный (не менее 10 дБ) запас по требованиям электромагнитной совместимости. Таким образом, на периоде несущей частоты сигнала должно быть взято 1024 временных отсчета.

Для используемой в данном исследовании несущей частоты 150 кГц шаг моделирования оказывается равным 6,5 нС. С учетом того, что необходимо моделировать работу УМРС на временном интервале в сотни миллисекунд, время симуляции становится слишком велико. В связи с этим в модель передатчика, в дополнение к модулируемому ключевому каскаду, был добавлен узел восстановления передаваемого сигнала на основе аналогового перемножителя.

На рисунке 5 приведён фрагмент вышеописанной модели передатчика, поясняющий принцип использования дополнительного модуля.

На вход модели с выхода возбудителя поступает комплексный OFDM сигнал и его огибающая. Путём деления комплексного сигнала на огибающую выделяется ФМ составляющая сигнала на первой гармонике. В принципе её спектр тоже бесконечен, однако спадает гораздо быстрее по сравнению со спектром предельно ограниченного сигнала (меандр). ФМ составляющая подаётся на вход ключевой ячейки.

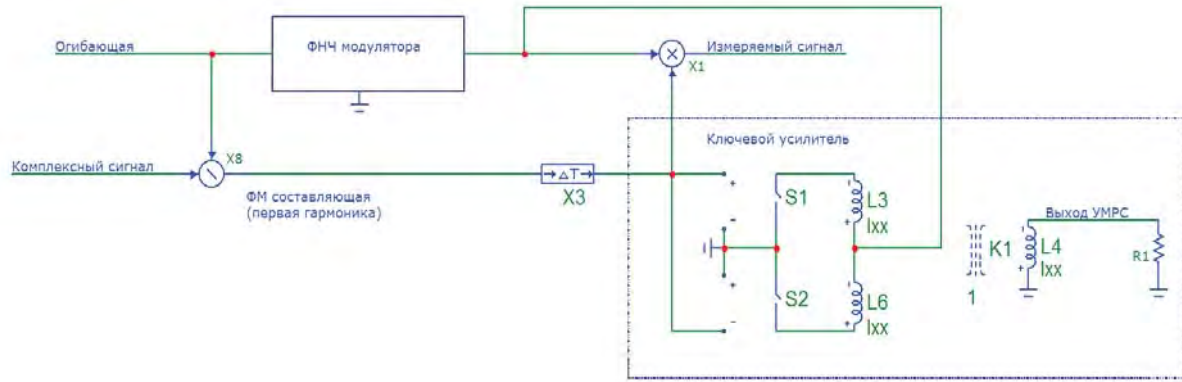


Рис. 5. Фрагмент схемы УМРС с ключевым и аналоговым модулями формирования передаваемого сигнала

Сигнал огибающей проходит через фильтр нижних частот и подаётся в цепь питания ключевой ячейки, где перемножается с ФМ составляющей. Таким образом, эта схема соответствует классическому УМРС. Однако в модель добавлен аналоговый перемножитель X1, один вход которого соединён с выходом ФНЧ, а на другой подаётся первая гармоника ФМ составляющей. Таким образом, на выходе перемножителя X1 также происходит восстановление передаваемого OFDM сигнала. При этом сигнал огибающей на его входе оказывается тем же, что и на ключевом усилителе и, соответственно, имеет ту же реакцию на цепь антенны.

При применении такой схемы шаг анализа был эмпирически выбран таким, чтобы адекватно моделировать реакцию УМРС на резонансную нагрузку. Полученный шаг оказался не менее 25 нс, что обеспечило существенный выигрыш в скорости по сравнению с прямым моделированием.

На выходе измерительного перемножителя также установлен эквивалент антенны (элементы L8, C12, R12 модели на рисунке 1), обеспечивающий соответствие его выходного сигнала выходному сигналу ключевого усилителя.

4. Примеры расчетов

Примеры расчета выходного спектра УМРС с помощью разработанной модели приведены на рисунке 6 (для согласованной нагрузки) и рисунке 7 (для узкополосной нагрузки). Параметры моделирования следующие: полоса пропускания двусторонне нагруженного ФНЧ с плавным переходом от Harris [26] 58 кГц (5,8 полос передаваемого сигнала); антенна с полосой пропускания 205 кГц (КСВ на краях спектра сигнала равен 1,05). Как видно из рисунка 7, спектр выходного сигнала находится на границе ограничительной маски на внеполосные излучения. Это соответствует требованиям [27] о допустимом КСВ узкополосной антенны для DRM передатчика не более 1,05.

Таким образом, проведенное моделирование позволяет сделать вывод об адекватности разработанной имитационной модели для исследования ключевых ВЧ усилителей мощности с разделным усилением составляющих.

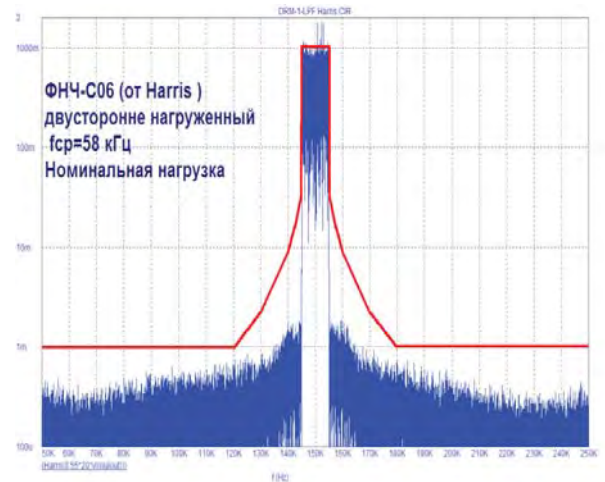


Рис. 6. Спектр выходного сигнала УМРС с полосой пропускания двусторонне нагруженного ФНЧ с плавным переходом от Harris [26] 58 кГц при работе на согласованную нагрузку

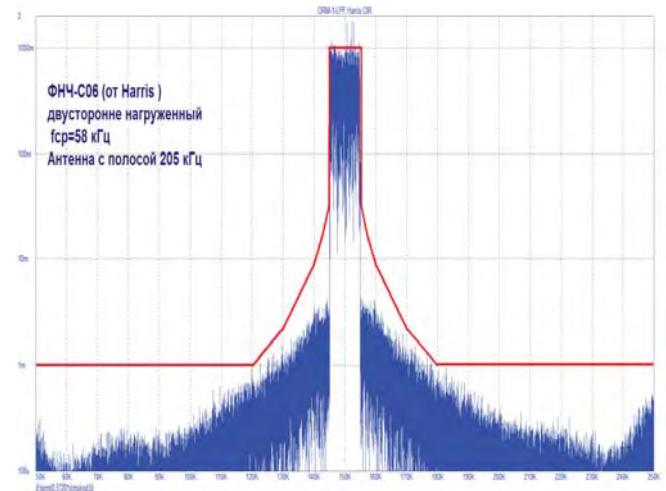


Рис. 7. Спектр выходного сигнала УМРС с полосой пропускания двусторонне нагруженного ФНЧ с плавным переходом от Harris [26] 58 кГц при работе на антенну с полосой пропускания 205 кГц (КСВ на краях спектра сигнала равен 1,05)

5. Заключение

Разработана имитационная модель для исследования ключевых ВЧ усилителей мощности с раздельным усилением составляющих, учитывающая особенности их работы на узкополосную нагрузку. Модель содержит идеализированные элементы, в частности идеальную ключевую ячейку и усилитель огибающей, что позволяет изолированно исследовать процессы, протекающие в ФНЧ модулятора и являющиеся основной причиной возникновения нелинейных искажений при работе УМРС на резонансную нагрузку. Примененные решения позволили осуществить моделирование работы УМРС с использованием реального DRM сигнала на достаточно больших интервалах времени, нивелирующих влияние статистических свойств сигнала.

Подтверждена адекватность результатов моделирования. Дальнейшие исследования предполагают использование данной модели для поиска решений по обеспечению возможности работы УМРС на более узкополосную нагрузку, что расширит области применения высокоэффективных УМРС.

Литература

1. Kahn L.R. Single-Sideband Transmission by Envelope Elimination and Restoration // Proceedings of the IRE, vol. 40, no. 7, pp. 803-806, July 1952, doi: 10.1109/JRPROC.1952.273844.
2. Cox D. Linear Amplification with Nonlinear Components // IEEE Transactions on Communications, vol. 22, no. 12, pp. 1942-1945, December 1974, doi: 10.1109/TCOM.1974.1092141.
3. Varlamov O.V., Chugunov I.V. Modeling of efficiency UHF class-D power amplifier with bandpass sigma-delta modulation // 2017 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SINKHROINFO), Kazan, 2017, pp. 1-3. DOI: 10.1109/SINKHROINFO.2017.7997508
4. Filimonov N., Varlamov O., Itkin G. Efficient modulation of RF signals // Патент на изобретение EP 1450479 B1. Заявка № EP20030003830 от 20.02.2003.
5. Варламов О.В., Нгуен Д.К., Грычкин С.Е. Комбинирование синтетических методов высокоэффективного высокочастотного усиления // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Том 15. №9. С.11-16.
6. Filimonov N., Varlamov O. Power amplifier circuit for amplifying RF-signals // Патент на изобретение EP 1229642 B1. Заявка № EP20010102249 от 31.01.2001.
7. Варламов О.В. Организация одночастотных сетей цифрового радиовещания стандарта DRM. Особенности и результаты практических испытаний // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2018. Т. 12. № 11. С. 4-20.
8. Варламов О.В., Варламов В.О., Долгопятова А.В. Международная сеть DRM вещания для создания информационного поля в Арктике // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2019. Т. 13. № 9. С. 9-16.
9. Данешманд Бехруз Мехди. Сравнительный анализ концепции создания и развития сетей 5G/IMT-2020 в России, Китае, США и Европе // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Том 15. №6. С. 20-32.
10. Бакулин М.Г., Крейнделин В.Б. Проблема повышения спектральной эффективности и емкости в перспективных системах связи 6G // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Т. 14. № 2. С. 25-31.
11. Крейнделин В.Б., Старовойтов М.Ю. Повышение помехоустойчивости системы связи ММО с пространственным мультиплексированием методом додетекторного сложения // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2017. Т. 11. № 4. С. 4-13.
12. Бакулин М.Г., Крейнделин В.Б., Панкратов Д.Ю. Применение технологии ММО в современных системах беспроводной связи разных поколений // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Т. 15. № 4. С. 4-12.
13. Varlamov O.V., Stroganova E.P. Frequency extension circuit for EER transmitters operating with electrically short antennas // 2018 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, Moscow, 2018, pp. 1-5. DOI: 10.1109/SOSG.2018.8350577.
14. Varlamov O. Research of influence of DRM broadcast transmitter nonlinearities onto the output signal parameters // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2014. Т. 8. № 2. С. 59-60.
15. Varlamov O.V., Gromorushkin V.N. Class D Switching Power Amplifier with a Filter under Load Mismatch // 2020 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF), Saint-Petersburg, Russia, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/WECONF48837.2020.9131508.
16. Gromorushkin V.N., Varlamov O.V. Experimental Studies of the Envelope Elimination and Restoration HF Power Amplifier Characteristics with Broadband Unmatched Load // 2021 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO), 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/SYNCHROINFO51390.2021.9488387.
17. Gromorushkin V.N., Varlamov O.V., Dolgopyatova A.V., Voronkov A.A. Operation Problems of the EER Transmitter with Narrowband Antenna // 2019 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, Moscow, Russia, 2019, pp. 1-5. DOI: 10.1109/SOSG.2019.8706736.
18. Atanasov A.N., Oude Alink M.S., van Vliet F.E. Reverse Intermodulation in Multi-Tone Array Transmitters // 2020 IEEE BiCMOS and Compound Semiconductor Integrated Circuits and Technology Symposium (BCICTS), 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/BCICTS48439.2020.9392972.
19. Varlamov O.V. Theoretical Approach to Calculating Reverse Intermodulation Distortion in Voltage Mode Class D RF Power Amplifiers // 2022 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/IEEECONF53456.2022.9744320.
20. Varlamov O.V. Multiphase PWM characteristics in the EER transmitter envelope path // 2021 International Conference on Engineering Management of Communication and Technology (EMCTECH), 2021, pp. 1-5, doi: 10.1109/EMCTECH53459.2021.9619166.
21. Bolotov A.O., Kholuykov R.G., Varlamov O.V. EER power amplifier modulator efficiency improvement using PWM with additional sigma-delta modulation // 2018 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO), Minsk, 2018, pp. 1-4. DOI: 10.1109/SYNCHROINFO.2018.8456955.
22. Козырев В.Б., Лаврушенков В.Г., Леонов В.П. и др. Транзисторные генераторы гармонических колебаний в ключевом режиме. Под ред. Попова И.А. М.: Радио и связь, 1985.
23. Варламов О.В. Максимальная мощность коммутируемого р-и-п диодами антенно-согласующего устройства диапазона ВЧ при рассогласовании нагрузки // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Т. 14. № 10. С. 26-32.
24. Varlamov O.V. Power Capacity of HF Automatic Antenna Tuner Switched by PIN Diodes under Load Mismatch Conditions // 2020 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO), Svetlogorsk, Russia, 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/SYNCHROINFO49631.2020.9166046.
25. Разевиг В.Д. Схемотехническое моделирование с помощью Micro-Cap 7. М.: Горячая линия-Телеком, 2003. 368 с.



26. Альбом схем передатчика DAX фирмы Harris. Интернет ресурс: <http://www.broadcastengineering.info/download/file.php?id=550&sid=07638ff6e2d0e62d7925187ca73f8d30>, Accessed 06/07/2022

27. Huber J. DRM on MF and LF coverage and technical requirements // EBU-DRM Conference, 26 Nov 2009, [online] Available: https://tech.ebu.ch/docs/events/drm09/presentations/ebu_drm09_huber.pdf.

28. Varlamov O.V., Gromorushkin V.N. High Efficiency Power Amplifier for IoT Applications: RF Path // 2020 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, Moscow, Russia, 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/IEEECONF48371.2020.9078651.

29. Аль намер Зайнал. Архитектура умного дома интернет вещей // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Том 15. №8. С. 58-61.

30. Антонова В.М., Маликова Е.Е., Панов А.Е., Спичек И.В., Маликов А.Ю. Реализация технологии IoT для мониторинга данных через облачный сервис // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Том 15. №2. С. 46-53.

31. Степанов М.С., Поскотин Л.С., Шишкин Д.В., Тургут Тимур, Музата А.Р. Применение протокола ZigBee для организации системы "Умный дом" для пожилых людей // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Том 15. №10. С. 64-70.

32. Довбня В.Г., Фролов С.Н., Сулима К.П., Щитов А.Н. Специфика реализаций комплексов управления на базе технологии LoRaWAN // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Том 14. №9. С. 24-30.

33. Дмитриев Э.М., Рогожников Е.В., Мовчан А.К., Мухамдиев С.М., Крюков Я. В., Дуплицева Н.В. Исследование технологии расширения спектра и её применение в системах передачи данных по цепям электропитания // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Том 14. №10. С. 45-52.

34. Рогожников Е.В., Дмитриев Э.М., Абенов Р.Р. Полнодуплексная система передачи данных по цепям питания. Аналоговая компенсация, концепция построения и проблемы организации // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2019. Том 13. №8. С. 21-27.

35. Сарьян В.К., Назаренко А.П., Фролов А.И. Цифровая система индивидуализированного управления спасением людей в чрезвычайных ситуациях: правовые аспекты // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Т. 14. № 11. С. 33-38.

36. Горгадзе С.Ф., Максимов А.А. Теория гармонического баланса для схемотехнического проектирования // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Т. 14. № 11. С. 21-32.

SIMULATION MODEL FOR STUDYING THE OPERATION OF SWITCHING MODE ENVELOPE ELIMINATION AND RESTORATION RF POWER AMPLIFIERS FOR A NARROW-BAND LOAD

DANG C. NGUYEN

Moscow, Russia, nguyendangcanh1319951@gmail.com

OLEG V. VARLAMOV

Moscow, Russia, vov@mtuci.ru

KEYWORDS: *high efficiency RF power amplifier, switching mode, class D, envelope elimination and restoration, load mismatch, simulation model.*

ABSTRACT

Introduction: High-efficiency switching mode envelope elimination and restoration (EER) RF power amplifiers (PA) are the most promising of a number of "synthetic" power amplification methods for a wide variety of applications. However, when they operate on a mismatched narrow-band load, for example, an electrically short antenna, additional out-of-band emission occurs, which limits the EER PA scope. **The purpose of the work** is to develop a simulation model for studying the EER switching mode RF PA operation for a narrow-band load. The choice of transient analysis method and use of the freely distributed simulation environment Micro-Cup 12 **are substantiated**. A number of original solutions are proposed to reduce the computation time. The description of developed model is given, which makes it possible to study the features of the EER PA operation on a narrow-band antenna on a real signal with amplitude-phase modulation fragment. As an example, a DRM digital radio OFDM signal with 10 kHz bandwidth is used. Studies conducted

using this model can be proportionally scaled for any frequency band and will allow further development of technical requirements for the EER PA blocks characteristics. **Some calculations results** showing the developed model adequacy are presented. **Practical significance:** the use of this model for the subsequent search for solutions to ensure the possibility of EER PA operation for a narrower band load will expand the scope of these high-efficiency power amplifiers.

REFERENCES

1. Kahn L. R. (1952). "Single-Sideband Transmission by Envelope Elimination and Restoration," *Proceedings of the IRE*, vol. 40, no. 7, pp. 803-806, July 1952, doi: 10.1109/JRPROC.1952.273844.
2. Cox D. (1974). "Linear Amplification with Nonlinear Components," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 22, no. 12, pp. 1942-1945, December 1974, doi: 10.1109/TCOM.1974.1092141.
3. Varlamov O. V. and Chugunov I. V. (2017). "Modeling of efficiency UHF class-D power amplifier with bandpass sigma-delta modulation," *2017 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications*

(*SINKHROINFO*), Kazan, 2017, pp. 1-3. DOI: 10.1109/SINKHROINFO.2017.7997508

4. Filimonov N., Varlamov O., Itkin G. Efficient modulation of RF signals. Patent EP 1450479 B1. Appl. No. EP20030003830, 20.02.2003.

5. Varlamov O.V., Nguyen D.C., Grychkin S.E. (2021) Combination of synthetic high-performance RF amplification techniques. *T-Comm*, vol. 15, no.9, pp. 11-16.

6. Filinonov N., Varlamov O. Power amplifier circuit for amplifying RF-signals. Patent EP 1229642 B1. Appl. No. EP20010102249, 31.01.2001.

7. Varlamov O.V. (2018). Organization of single frequency DRM digital radio broadcasting networks. Features and results of practical tests. *T-Comm*, vol. 12, no.11, pp. 4-20.

8. Varlamov O.V., Varlamov V.O., Dolgopyatova A.V. (2019). DRM broadcasting international network to create an information field in the Arctic region. *T-Comm*, vol. 13, no.9, pp. 9-16.

9. Behrooz Daneshmand (2021) Comparative analysis of the concept of creation and development of 5G/IMT-2020 networks in Russia, China, USA and Europe. *T-Comm*, vol. 15, no.6, pp. 20-32.

10. Bakulin M.G., Kreyndelin V.B. (2020) The problem of spectral efficiency and capacity increase in perspective 6G communication systems. *T-Comm*, vol. 14, no.2, pp. 25-31.

11. Kreindelin V.B., Starovoytov M.Yu. (2017). Application of predetector receive signal combining to improve the performance of MIMO spatial multiplexing. *T-Comm*, vol. 11, no.4, pp. 4-13.

12. Bakulin M.G., Kreyndelin V.B., Pankratov D.Yu. (2021) Application of MIMO technology in modern wireless communication systems of different generations. *T-Comm*, vol. 15, no. 4, pp. 4-12.

13. Varlamov O. V. and Stroganova E. P. (2018). "Frequency extension circuit for EER transmitters operating with electrically short antennas," *2018 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*, Moscow, pp. 1-5. DOI: 10.1109/SOSG.2018.8350577.

14. Varlamov O. (2014). "Research of influence of DRM broadcast transmitter nonlinearities onto the output signal parameters," *T-Comm*. 2014. Vol. 8. No 2, pp. 59-60.

15. Varlamov O. V. and Gromorushkin V. N. (2020). "Class D Switching Power Amplifier with a Filter under Load Mismatch Conditions," *2020 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*, Saint-Petersburg, Russia, pp. 1-6, doi: 10.1109/WECONF48837.2020.9131508.

16. Gromorushkin V. N. and Varlamov O. V. (2021). "Experimental Studies of the Envelope Elimination and Restoration HF Power Amplifier Characteristics with Broadband Unmatched Load," *2021 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*, pp. 1-4, doi: 10.1109/SYNCHROINFO51390.2021.9488387.

17. Gromorushkin V. N., Varlamov O. V., Dolgopyatova A. V. and Voronkov A. A. (2019). "Operation Problems of the EER Transmitter with Narrowband Antenna," *2019 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*, Moscow, Russia, pp. 1-5. DOI: 10.1109/SOSG.2019.8706736

18. Atanasov A. N., Oude Alink M. S. and van Vliet F. E. (2020). "Reverse Intermodulation in Multi-Tone Array Transmitters," *2020 IEEE BICMOS and Compound Semiconductor Integrated Circuits and Technology Symposium (BCICTS)*, pp. 1-4, doi: 10.1109/BCICTS48439.2020.9392972.

19. Varlamov O. V. (2022). "Theoretical Approach to Calculating Reverse Intermodulation Distortion in Voltage Mode Class D RF Power Amplifiers," *2022 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*, pp. 1-6, doi: 10.1109/IEEECONF53456.2022.9744320.

20. Varlamov O. V. (2021). "Multiphase PWM characteristics in the EER transmitter envelope path," *2021 International Conference on Engineering Management of Communication and Technology (EMCTECH)*, pp. 1-5, doi: 10.1109/EMCTECH53459.2021.9619166.

21. Bolotov A. O., Kholyukov R. G. and Varlamov O. V. (2018). "EER power amplifier modulator efficiency improvement using PWM with additional sigma-delta modulation," *2018 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*, Minsk, pp. 1-4. DOI: 10.1109/SYNCHROINFO.2018.8456955.

22. Kozyrev V. B., Lavrushenkov V. G., Leonov V. P., Novikov G. V., Petyashin N. B., Popov I. A., Kharitonov A. V., Gromorushkin V. N. (1985). Transistor harmonic oscillators in switch mode. Moscow, Radio and communication.

23. Varlamov O. V. (2020). Maximum power of the HF antenna tuner switched by PIN diodes at load mismatch. *T-Comm*, vol. 14, no.10, pp. 26-32.

24. Varlamov O. V. (2020). Power Capacity of HF Automatic Antenna Tuner Switched by PIN Diodes under Load Mismatch Conditions. *2020 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*, Svetlogorsk, Russia, pp. 1-5, doi: 10.1109/SYNCHROINFO49631.2020.9166046.

25. Razevig V.D. (2003). Circuit Modeling Using Micro-Cap 7. Moscow, Hotline-Telecom.

26. Harris DAX Transmitter Schematic Album. [online] Available: <http://www.broadcastengineering.info/download/file.php?id=550&sid=07638ff6e2d0e62d7925187ca73f8d30>, Accessed 06/07/2022.

27. Huber J. "DRM on MF and LF coverage and technical requirements", EBU-DRM Conference, 26 Nov 2009, [online] Available: https://tech.ebu.ch/docs/events/drm09/presentations/ebu_drm09_huber.pdf.

28. Varlamov O. V. and Gromorushkin V. N. (2020), "High Efficiency Power Amplifier for IoT Applications: RF Path," *2020 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*, Moscow, Russia, pp. 1-5, doi: 10.1109/IEEECONF48371.2020.9078651.

29. Al namer Zainal (2021). The architecture of smart home internet of things. *T-Comm*, vol. 15, no.8, pp. 58-61.

30. Antonova V.M., Malikova E.E., Panov A.E., Spichek I.V., Malikov A.Y. (2021) Implementation of IoT technology for data monitoring via cloud services. *T-Comm*, vol. 15, no.2, pp. 46-53.

31. Stepanov M.S., Poskotin L.S., Shishkin D.V., Timur Turgut, Muzata A.R. (2021). The using of ZigBee protocol to organize the "Smart Home" system for aged people. *T-Comm*, vol. 15, no.10, pp. 64-70.

32. Dovbnya V.G., Frolov S.N., Sulima K.P., Schitov A.N. (2020) Specifics of implementation of control systems based on LoRaWAN technology. *T-Comm*, vol. 14, no.9, pp. 24-30.

33. Dmitriyev E.M., Rogozhnikov E.V., Movchan A.K., Mukhamadiev S.M., Krukov Y.V., Duplishcheva N.V. (2020) Spread spectrum technology research and its application in power line communication systems. *T-Comm*, vol. 14, no.10, pp. 45-52.

34. Rogozhnikov E.V., Dmitriyev E.M., Abenov R.R. (2019). Full duplex power line transmission system. Concept of construction and problems of organizing analog compensation. *T-Comm*, vol. 13, no.8, pp. 21-27.

35. Sarian V.K. Nazarenko A.P. Frolov A.I. (2020) The Digital Personal Emergency Rescue System: economic and legal aspects. *T-Comm*, vol. 14, no.11, pp. 33-38.

36. Gorgadze S.F., Maximov A.A. (2020) Harmonic balance theory for scheme technical design. *T-Comm*, vol. 14, no.11, pp. 21-32.

INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Dang C. Nguyen, postgraduate student, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia

Oleg V. Varlamov, Doctor of Technical Sciences, Docent, Professor of the Department "Radio equipment and circuitry", Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia

For citation: Dang C. Nguyen D.C., Varlamov O.V. Simulation model for studying the operation of switching mode envelope elimination and restoration RF power amplifiers for a narrow-band load. *H&ES Reserch*. 2022. Vol. 14. No 2. P. 10-18. doi: 10.36724/2409-5419-2022-14-2-10-18 (In Rus)



doi: 10.36724/2409-5419-2022-14-2-19-26

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВАРИАНТОВ МНОГОСТАНЦИОННОГО ДОСТУПА ДЛЯ СОТОВЫХ СЕТЕЙ 5G И 6G

ГОРГАДЗЕ

Светлана Феликсовна¹

ЕРМАКОВА

Анастасия Всеволодовна²

АННОТАЦИЯ

Введение: внедрение сетей IMT2020 (5G) позволяет значительно улучшить характеристики мобильных систем связи предыдущих поколений в части усовершенствования широкополосного многостанционного доступа (eMBB – enhanced Mobile Broadband) и обеспечения сверхнадежной связи с низкой задержкой (ULLRC – Ultra Low Latency Reliable Communication). **Цель работы** обзор и сравнительный анализ технологий многостанционного доступа для перспективных сетей мобильной связи, основу которых составляет OFDM. **Результат:** Рассмотрены общие принципы формирования и обработки сигналов при использовании вариантов сигналов с OFDM при использовании различных методов цифровой фильтрации поднесущих частот. При тех вариантах OFDM, когда может не использоваться циклический префикс (FBMC, UFMC) возможность увеличения скорости передачи информации является спорной, так как импульсные отклики фильтров, например при FBMC значительно превосходят длительность информационных сигналов, что увеличивает межсимвольную интерференцию. **Практическая значимость:** Проведенный анализ общих принципов построения устройств формирования и обработки сигналов физического уровня для вариантов OFDM при различных способах дополнительной цифровой фильтрации поднесущих частот показывает, что во всех случаях происходит значительное усложнение цифровых алгоритмов формирования и обработки сигналов при практическом отсутствии или в отдельных случаях небольшом выигрыше (не более (0.5-0.8) дБ в отношении сигнал/шум) по величине ошибки на информационный бит. На основе результатов компьютерного моделирования показано, что технология OFDM и ее варианты не позволяют получить прорывных решений в области характеристик сигналов физического уровня для сетей 5G и 6G, и следует рассматривать альтернативные варианты построения групповых сигнальных конструкций.

Сведения об авторах:

¹ профессор, доктор технических наук,
МТУСИ, Москва, Россия,
svetlana-gorgadze@yandex.ru

² аспирант, МТУСИ, Москва, Россия,
msikisyliya@gmail.com

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов, гребенка (банк) фильтров, поднесущая частота, цифровая фильтрация поднесущих, фильтрация группы поднесущих, эффективность радиоканала.

Для цитирования: Горгадзе С.Ф., Ермакова А.В. Эффективность вариантов многостанционного доступа для сотовых сетей 5G и 6G // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2022. Т. 14. № 2. С. 19-26.
doi: 10.36724/2409-5419-2022-14-2-19-26

Введение

Внедрение сетей IMT2020 (5G) позволяет значительно улучшить характеристики мобильных систем связи предыдущих поколений в части усовершенствования широкополосного многостанционного доступа (eMBB – enhanced Mobile Broadband) и обеспечения сверхнадежной связи с низкой задержкой (ULLRC – Ultra Low Latency Reliable Communication) [1, 2]. К новым возможностям таких сетей относятся поддержка на их основе интернета вещей (IoT – Internet of Things), промышленного интернета вещей (IIoT – Industrial Internet of Things) и обширных межмашинных коммуникаций (mMTC – massive Machine Type Communication) [3,4]. Несмотря на то, что стандартизация технологий и решений сетей 5G еще не завершена, по всему миру началась разработка технологии 6G с целью внедрения и развития новых интеллектуальных сервисов – таких как создание виртуальной и смешанной реальности, поддержка беспроводного взаимодействия мозга и компьютера, тактильной и голографической связи и т.д. [5]. Основные технические характеристики сетей 5G и 6G представлены в сводной таблице 1, составленной по результатам анализа зарубежных публикаций [5-8].

Таблица 1

Технические характеристики сетей 5G и 6G

Ключевые показатели эффективности	5G	6G
Пиковая скорость передачи данных	10Гбит/с	1Тбит/с
Задержка	10 мс	<1 мс
Спектральная эффективность нисходящего канала	30бит /с/Гц	100бит/с/Гц
Повышение энергоэффективности, по сравнению с 4G	в 10 раз	в1000 раз
Плотность подключения	10 ⁶ устройств/км ²	10 ⁸ устройств/км ²
Диапазон частот	Sub-6 ГГц (миллиметровые волны для фиксированного доступа)	Sub-6 ГГц (миллиметровые волны для фиксированного и мобильного доступа). Выше 300 ГГц – видимая с этовая полоса
Режим покрытия	Сотовые сети	Сотовые сети/ Интегрирование в аэрокосмические сети
Точность позиционирования	метр	сантиметр
Чувствительность приемника	-120 дБм	<-130 дБм
Надежность	Высокая	Высокая

Очевидно, что достижение столь высоких показателей эффективности требует прорывных решений на всех уровнях разработки этих сетей. Между тем, в качестве основной технологии многостанционного доступа как ранее для сетей

4G, так и для новых сетей 5G и 6G, рассматриваются варианты мультиплексирования с ортогональным частотным разделением каналов (OFDM – Orthogonal frequency-division multiplexing).

Цель данной работы – обзор и сравнительный анализ технологий многостанционного доступа для перспективных сетей мобильной связи, основу которых составляет OFDM.

1. Варианты многостанционного доступа

Несмотря на то, что варианты OFDM довольно подробно описаны в литературе, в русскоязычных источниках имеются некоторые разночтения в трактовке процедур, осуществляемых при их реализации [9, 10]. Поэтому ниже приводится описание их сути, соответствующее последующим способам их моделирования с целью сопоставления по эффективности.

Структурная схема устройства формирования сигнала с OFDM показана на рисунке 1а. Она предполагает использование цифрового блока обратного быстрого преобразования Фурье (ОБПФ), на входе которого последовательность двоичных информационных символов преобразуется в параллельные потоки комплексных канальных символов, предназначенных для I/Q модуляции поднесущих частот в соответствии с используемым вариантом квадратурной амплитудной модуляции (QAM).

Полученные комплексные числа будем называть информационными символами QAM, а соответствующие им сигналы, сформированные на поднесущих или высоких частотах – информационными сигналами QAM. Модуляция поднесущих частот на основе символов QAM осуществляется непосредственно в блоке ОБПФ, поскольку процедуру преобразования дискретного сигнала в нем можно рассматривать как перемножение матрицы, эрмитово-сопряженной так называемой матрице дискретных экспоненциальных функций (ДЭФ) [11], на комплексный спектр сигнала, в качестве которого в данном случае используются комплексные символы QAM.

Для реализации модуляции на входе блока ОБПФ с помощью временного окна производится выборка комплексных символов QAM, которые будут передаваться одновременно на всех поднесущих частотах, после чего производится их последовательно-параллельное преобразование в пределах этого окна. Таким образом, на выходе блока ОБПФ в параллельной форме будут дискретные отсчеты суммы поднесущих частот (групповой сигнал), модулированных в соответствии с передаваемыми канальными информационными символами, причем число поднесущих в общем случае равно числу одновременно передаваемых канальных информационных символов и числу отсчетов результирующего группового сигнала с выхода блока ОБПФ. Но число используемых поднесущих частот может быть и меньше, и их расстановка по выделенной полосе частот может быть произвольной. Для этого можно формально приравнять к нулю канальные символы, которые передаются на соответствующих неиспользуемых поднесущих частотах.

Затем к отсчетам сформированного фрагмента группового сигнала спереди добавляется циклический префикс, являющийся повторением его окончания, что упрощает его

обработку в блоке быстрого преобразования (БПФ) приемника при многолучевом распространении, так как линейная свертка результирующего сигнала обрабатывается как циклическая. Сигнал преобразуется в параллельно-последовательном и цифро-аналоговом преобразователях, переносится на рабочую частоту и передается на вход высокочастотного усилительного тракта передатчика.

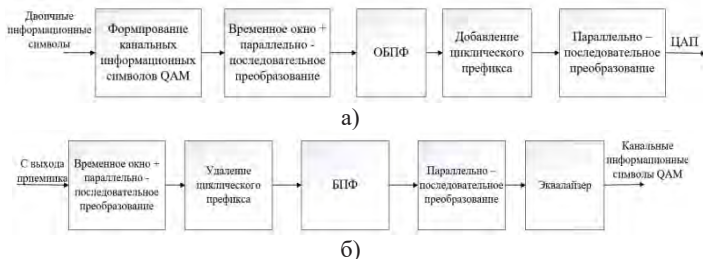


Рис. 1. Схемы формирования (а) и обработки (б) сигнала OFDM

В приемнике, показанном на рис. 1б), входной сигнал с выхода его стандартного радиочастотного блока переводится на видеочастоту, а затем преобразуется в аналого-цифровом преобразователе. Временное окно с длительностью, равной длительности канальных информационных сигналов для их последующей подачи на блок БПФ, можно правильно расположить относительно этих сигналов только в результате адекватной синхронизации канала связи по времени. В пределах этого временного окна реализуется последовательно-параллельное преобразование потока отсчетов канальных информационных сигналов.

Полученные отсчеты в параллельной форме подаются на блок, в котором реализуется быстрое преобразование Фурье (БПФ). С его выхода в параллельной форме получаем канальные информационные символы, каждый из которых был передан на своей поднесущей частоте. В эквалайзере производится оценка состояния канала обычно по принятым информационным символам пилотных поднесущих. Эти поднесущие используются и для решения задач синхронизации по времени. Оценки искажений сигнала, полученные в результате работы эквалайзера, используются при последующей обработке канальных информационных символов.

Наиболее перспективным вариантом OFDM считается технология, основанная на частотном мультиплексировании множества поднесущих при их фильтрации с использованием гребенки (банка) фильтров (FBMC – Filter-Banc Multi-Carrier Modulation). При этом на каждой поднесущей частоте используется квадратурная амплитудная модуляция со сдвигом ее составляющих по времени (OQAM – Offset Quadrature Amplitude Modulation). Этот вид модуляции в литературных источниках обозначают как FBMC/OQAM [12].

Как показано на рисунке 2а, комплексные канальные информационные символы, которые в случае классического варианта OFDM, рассмотренного выше, предназначались бы непосредственно для квадратурной амплитудной модуляции поднесущих частот в блоке ОБПФ, подаются на блок формирования канальных символов OQAM. Суть процедур, реализуемых в этом блоке, можно пояснить следующим образом: представим, что действительные и мнимые части символов QAM выстраиваются параллельно, в результате чего

получаются два потока чисел – один из действительных частей символов QAM, а другой из мнимых. Затем эти символы удваиваются, и поток мнимых частей смещается на один символ влево или вправо. У вновь полученных комплексных символов OQAM их действительные и мнимые части находятся напротив друг друга. При этом скорость передачи символов OQAM такая же, как и символов QAM, но скорость передачи исходного информационного потока уменьшилась в два раза. Для того, чтобы этого не происходило, надо увеличить скорость потока OQAM в два раза, но исходная скорость передачи информации остается такой же, как и в случае классического варианта OFDM.

Сформированный поток комплексных символов OQAM преобразуется в последовательно-параллельном преобразователе в пределах необходимого временного окна для выделения символов, которые будут передаваться одновременно, и поступает на блок ОБПФ. Обычно используются параллельно два таких блока (ОБПФ1 и ОБПФ2) – один для потока действительных частей символов QAM (в качестве мнимых частей комплексных символов передаются нули), а другой – для мнимых частей (в качестве действительных частей передаются нули). Отметим, что применение QAM в сочетании с фильтрацией сигналов на каждой поднесущей частоте позволяет одновременно уменьшить как интерференцию между синфазными и квадратурными составляющими сигналов QAM, так и классическую межсимвольную интерференцию между ними.

Цифровая фильтрация сигнала на каждой поднесущей частоте при FBMC не может быть реализована на выходе блока ОБПФ, так как с него поступает сумма сигналов на всех поднесущих в параллельной форме. Поэтому она осуществляется непосредственно вместе с процедурой ОБПФ путем преобразования цифрового сигнала с помощью PPN (PolyPhase Network) [12]. В зависимости от типа применяемых фильтров можно обеспечить лучшую частотную или (и) временную локализацию информационного сигнала на каждой поднесущей частоте, по сравнению с OFDM. При этом хорошая частотная локализация позволяет уменьшить межсимвольную интерференцию, как и временная локализация.

Интерференцию синфазных и квадратурных символов позволяет уменьшить и их сдвиг по времени. Одновременное улучшение локализации символов как по частоте, так и по времени позволяют обеспечить следующие цифровые фильтры: с импульсной характеристикой, соответствующей так называемой функции IOTA (Isotropic Orthogonal Transform Algorithm), с регулируемой характеристикой приподнятого косинуса, типа TFL1 [12,13], обладающего довольно низкой вычислительной сложностью преобразования цифрового сигнала на приемной стороне, по сравнению с другими типами цифровых фильтров, также при разработке банка фильтров используется преобразование Эрмита.

Благодаря хорошей временной локализации канальных информационных сигналов при FBMC может не использоваться циклический префикс. Далее, сигналы с выходов блоков ОБПФ1 и ОБПФ2 с PPN складываются, преобразуются в параллельно-последовательном и цифро-аналоговом преобразователях и подаются на высокочастотный усилительный тракт радиопередатчика.

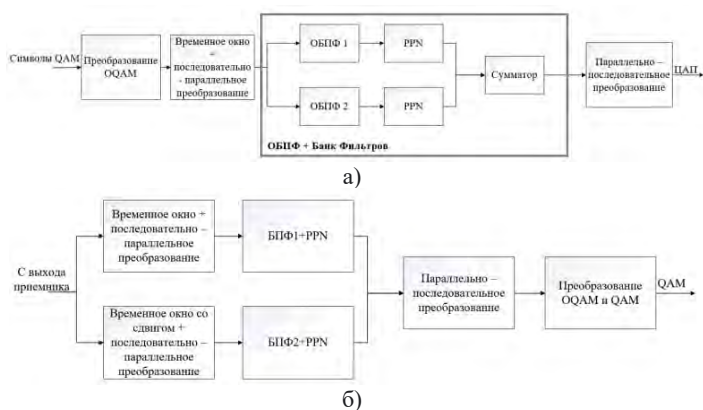


Рис. 2. Схемы формирования (а) и обработки (б) сигнала FBMC/OQAM

Очевидно, что в структуре переданных информационных сигналов OQAM содержатся информационные сигналы QAM. На приемной стороне локализация временного окна для подачи сигнала на блок БПФ может быть осуществлена по границам действительных канальных сигналов QAM. В этом случае при обработке сигнала в последующем блоке БПФ ортогональными будут только действительные их части, переданные на разных поднесущих частотах, а мнимые части не будут ортогональны. Но также можно использовать локализацию временного окна по границам мнимых составляющих (со сдвигом по времени на один символ OQAM), и тогда ортогональными будут лишь мнимые части сигнала QAM. Поэтому так же, как и при формировании этого сигнала, на приемной стороне необходимо использовать два параллельных канала для обработки его действительной и мнимой частей как показано на рисунке 2б.

Процедура БПФ осуществляется вместе с цифровой фильтрацией поднесущих частот с помощью PPN. При этом с выхода верхнего блока БПФ1+PPN используем лишь действительные части, а с выхода БПФ2+PPN – лишь мнимые части. После их объединения получаем символы OQAM в параллельной форме. После их параллельно-последовательного преобразования и соответствующего сдвига по времени получим поток символов QAM. С другой стороны, с выхода приемника можно сразу разделить действительную и мнимую части принятого сигнала. Суть процедур, описанных выше, при этом не изменяется. Ранее в ряде работ было показано, что при FBMC не целесообразно использовать эквалайзер на приемной стороне из-за того, что мнимые составляющие принимаемого сигнала не являются ортогональными. В действительности это не так, поскольку эквалайзер следует использовать после восстановления переданных символов QAM. Но надо учитывать, что эквалайзер – это довольно инерционное устройство, и его использование в сочетании с «длинными» импульсными откликами фильтров, которые существенно превосходят длительности информационных сигналов, приведет к значительной задержке при обработке сигналов и инерционности всего приемника. В последнее время появились работы, в которых разработаны новые конструкции эквалайзеров, которые используются в системах с FBMC в обратном канале в

сочетании с большими массивами антенн на базовой станции, и доказана их высокая эффективность [13].

Заслуживает внимания вариант OFDM с ортогональным частотным разделением сигналов при фильтрации групп поднесущих частот (F-OFDM – Filtered Orthogonal frequency-division multiplexing). В этом случае параллельный поток символов QAM с N одновременно передаваемыми символами делится на P подпотоков с одинаковым или разным количеством символов, передаваемых одновременно в каждом из них, как показано на рисунке 3а. Для понимания сути последующих преобразований представим, что в каждом подпотоке количество одновременно передаваемых символов увеличено до N символов путем добавления нулей. Затем эти подпотоки одновременно подаются на P блоков ОБПФ, к сигналам на выходах которых могут добавляться циклические префиксы, как показано на рисунке 3а. Но необходимость использования префиксов зависит от характеристик последующих цифровых фильтров, которые находятся на выходе блоков ОБПФ. На рисунке 3а фильтры показаны как их цифровые импульсные отклики (весовые окна) $fi[n]$, $i=1, \dots, P$.

Отметим, что длина весового окна фильтра оказывает решающее влияние на характеристики системы с F-OFDM, так как ее увеличение позволяет уменьшить внеполосные излучения и межсимвольную интерференцию благодаря улучшению частотной локализации сигналов, передаваемых одновременно поднесущих частотах, но одновременно увеличивается длительность символов. С другой стороны, использование более коротких временных окон улучшает временную локализацию информационных сигналов. Довольно часто используются весовые окна с длиной, соответствующей длине циклического префикса, который в этом случае не используется. Например, в работе [5] рассматривается использование окна Дольфа-Чебышева с подавлением бокового лепестка, составляющем 60дБ. Затем сигналы с выходов всех фильтров складываются, преобразуются в параллельно-последовательном и цифро-аналоговом преобразователях. Полученный результирующий сигнал преобразуется на рабочую частоту и передается на высокочастотный усилительный тракт радиопередатчика. В действительности нет необходимости использовать N -точечное ОБПФ P раз, так как существуют ускоренные алгоритмы работы с усеченными матрицами ДЭФ. На приемной стороне осуществляются обратные преобразования полученного сигнала в соответствии с рисунком 3б.

Целью использования F-OFDM является улучшение характеристик сигнала, по сравнению с классическим вариантом OFDM, так как он позволяет уменьшить уровень внеполосных излучений и одновременно – частотную и временную локализацию поднесущих частот, то есть уменьшить межсимвольную интерференцию как по сравнению с классическим вариантом OFDM, так и с возможным вариантом использования дополнительной фильтрации всего сигнала OFDM с целью снижения лишь внеполосных излучений. Преимущества F-OFDM, по сравнению с FBMC, объясняются меньшей длительностью импульсных откликов применяемых фильтров.

Таблица 2

Параметры модели каналов связи

Но варианта	Канал с быстрыми замираниями		Канал с медленными замираниями	
	Относительная задержка при передаче сигнала (нс)	Средняя мощность сигнала (дБ)	Относительная задержка (нс)	Средняя мощность сигнала (дБ)
1	0	0	0	0
2	300	-1	205	-0,9
3	720	-10	205	-5,9
4	1050	-11	1270	-9
5	1630	-15	2350	-8
6	2530	-21	3720	-24,9

Таблица 3

Параметры сигналов

Параметр	OFDM	FBMC	FOFDM	UFMC
Тип модуляции	QAM-16, QAM-64, QAM-256	QAM-4, QAM-16, QAM-64, QAM-256	QAM-4, QAM-16, QAM-64, QAM-256	QAM-4, QAM-16, QAM-64, QAM-256
Размер БПФ/число использованных поднесущих	256/200, 512/300	256/200, 512/300	256/200, 512/300	256/200, 512/300
Тип фильтра	-	На основе преобразования Эрмита	Окно Ханнинга	Окно Дольфа-Чебышева
Длина циклического префикса	4,8	-	-	-
Разнос поднесущих (кГц)	15	15	15	15
Модель канала	Модель Джейкса	Модель Джейкса	Модель Джейкса	Модель Джейкса
Скорость абонента (км/ч)	10, 200, 500	10, 200, 500	10, 200, 500	10, 200, 500
Несущая частота (ГГц)	2.5	2.5	2.5	2.5

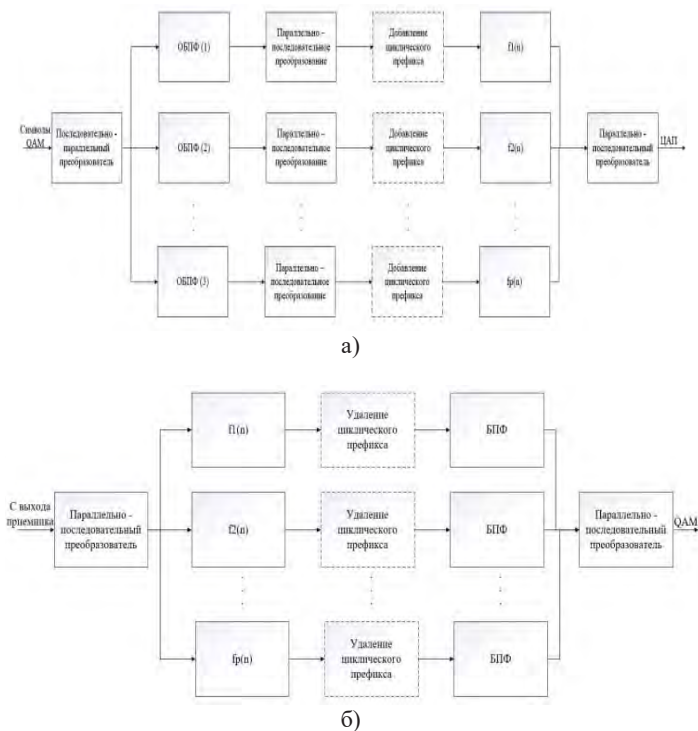


Рис. 3. Схемы формирования (а) и обработки (б) сигнала F-OFDM

Следующий вариант OFDM можно рассматривать как сочетание FBMC и F-OFDM, когда производится мультиплексирование блоков поднесущих частот и их фильтрация с помощью универсальных фильтров (UFMC – Universal Filtered Multicarrier). В этом случае поток символов OQAM получают из потока QAM так же, как и в случае FBMC, затем их преобразование в передатчике осуществляется так же, как и при F-OFDM. Таким образом, при UFMC, в отличие от FBMC, происходит фильтрация не каждой поднесущей, а группы соседних поднесущих частот. При этом оказывается возможным уменьшить внеполосные излучения, по сравнению с OFDM, без существенного увеличения длины символа, что имеет место в случае FBMC. Очевидным преимуществом UFMC, по сравнению с FBMC, будет меньшая задержка передачи данных [10].

2. Результаты моделирования

С целью сравнения систем с OFDM, FBMC, F-OFDM и UFMC по таким показателям эффективности как вероятность ошибки на информационный бит и значению пик-фактора результирующего сигнала при разных характеристиках канала связи была разработана имитационная модель их работы в среде MATLAB 2021. Параметры модели каналов связи перечислены в таблице 2.

Во всех случаях предполагалось использование эквалайзера на приемной стороне.

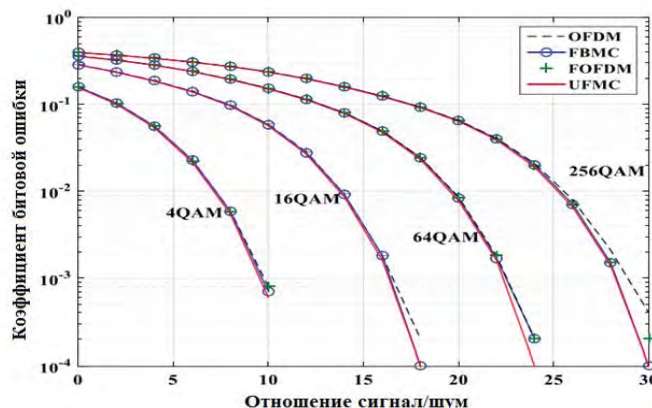


Рис. 4. Сравнение коэффициента битовой ошибки при аддитивном белом гауссовском шуме канала в случае 200 поднесущих и QAM-4, QAM-16, QAM-64 и QAM-256

Для вышеперечисленных вариантов OFDM результаты моделирования зависимости вероятности ошибки на информационный бит от отношения сигнал/шум в случае использования 200 поднесущих показаны на рисунке 4, из анализа которого следует, что эффективность FBMC, F-OFDM и UFMC практически одинаковая, но позволяет обеспечить довольно небольшой выигрыш порядка (0.5-1)дБ в отношении сигнал/шум, по сравнению с классическим вариантом OFDM.

На рисунке 5 показаны результаты моделирования коэффициента битовой ошибки в канале связи с быстрыми замираниями при числе используемых поднесущих, равном 200, QAM-64 и разных скоростях движения абонентской станции. Как видно, эффективность F-OFDM, UFMC и OFDM приблизительно одинаковая. При низких скоростях (меньше 100км/ч) FBMC незначительно проигрывает всем остальным вариантам OFDM. Но при больших скоростях порядка и более 200 км/ч FBMC значительно (до 3дБ в отношении сигнал/шум) выигрывает, по сравнению с другими вариантами. Но выигрыш имеет место только при сравнительно больших отношениях сигнал/шум – порядка 30-35дБ. Типичные значения вероятности ошибки на бит составляют при этом более 10^{-2} . Это объясняется, по-видимому, тем, что довольно высокая эффективность F-OFDM, UFMC и OFDM, по сравнению с FBMC при движении абонентской станции объясняется использованием эквалайзера, работа которого при высоких скоростях передачи информации становится неэффективной из-за его инерционности, в случае FBMC в данном случае эквалайзер не используется. Но выигрыш при FBMC имеет место при столь высоких значениях вероятности ошибки на бит, что даже и использование FBMC в этом случае не эффективно.

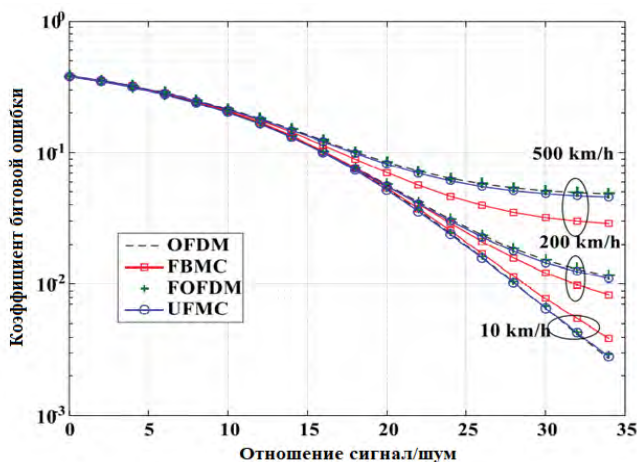


Рис. 5. Коэффициент битовой ошибки в канале связи с быстрыми замираниями в случае 200 поднесущих, QAM-64 и скоростей 10, 200, 500 км/ч

На рисунке 6 показан коэффициент битовой ошибки в случае канала связи с медленными замираниями при скорости 20 км/ч и использовании 200 поднесущих. Как видно, наилучшими характеристиками обладает вариант классического OFDM. FBMC и F-OFDM примерно одинаковы по эффективности и довольно значительно (на 4-5 дБ в отно-

шении сигнал/шум) проигрывают OFDM, но проигрыш имеет место при значительных отношениях сигнал/шум, превышающих 25-27дБ.

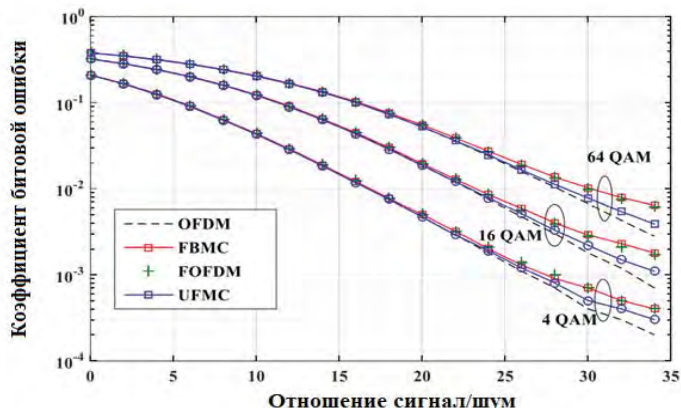


Рис. 6. Коэффициент битовой ошибки в канале с медленными замираниями в случае 200 поднесущих, скорости 10 км/ч и QAM-4, QAM-16, QAM-64

Важной характеристикой системы связи является значение пик-фактора ее группового сигнала физического уровня. Результаты исследования комплементарных интегральных функций распределения значений пик-фактора для рассматриваемых вариантов сигналов представлены на рисунке 7.

Из анализа этого рисунка следует, что использование любых типов фильтрации поднесущих частот приводит к увеличению пик-фактора результирующего сигнала, по сравнению с OFDM, которое достигает 1дБ при FBMC. Но в целом оно не слишком значительно, как можно было бы предполагать.

Результаты моделирования спектральных плотностей мощности исследуемых вариантов OFDM представлены на рисунке 8, которые соответствуют очевидному результату, состоящему в том, что фильтрация поднесущих частот приводит к уменьшению уровня внеполосных излучений, причем наибольший выигрыш в их уменьшении позволяет получить OFDM, по сравнению с OFDM.

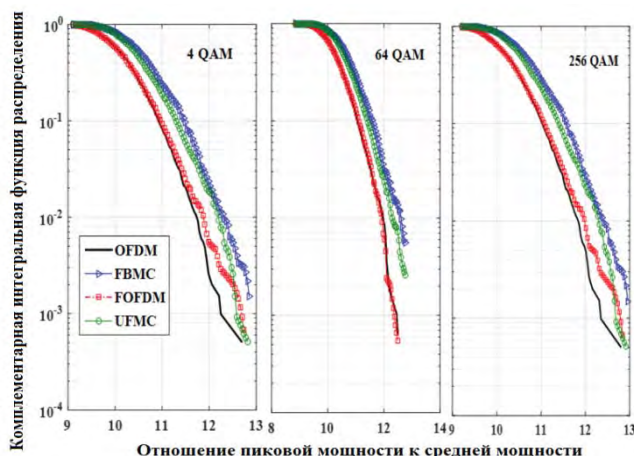


Рис. 7. Комплементарные интегральные функции распределения для QAM-4, QAM-64, QAM-256 при использовании 200 поднесущих частот

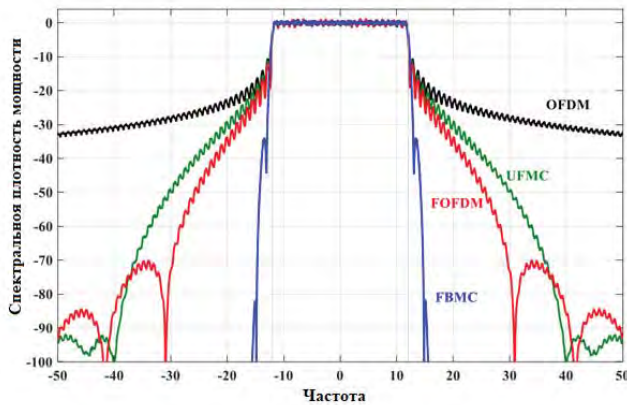


Рис. 8. Спектральные плотности мощности исследуемых вариантов OFDM для QAM-64 при 24 поднесущих частотах

Заключение

Проведенный анализ общих принципов построения устройств формирования и обработки сигналов физического уровня для вариантов OFDM при различных способах дополнительной цифровой фильтрации поднесущих частот показывает, что во всех случаях происходит значительное усложнение цифровых алгоритмов формирования и обработки сигналов при практическом отсутствии или в отдельных случаях небольшом выигрыше (не более (0.5-0.8) дБ в отношении сигнал/шум) по величине ошибки на информационный бит. При тех вариантах OFDM, когда может не использоваться циклический префикс (FBMC, UFMC) возможность увеличения скорости передачи информации является спорной, так как импульсные отклики фильтров, например при FBMC значительно превосходят длительность информационных сигналов, что увеличивает межсимвольную интерференцию.

Основным, но спорным преимуществом сигналов с цифровой фильтрацией поднесущих частот является значительный выигрыш в уровне внеполосных излучений, по сравнению с классическим вариантом OFDM. Но следует обратить внимание на то, что этот уровень на практике существенно зависит от искажений сигнала в радиопередатчике, и связан с его пик-фактором сигнала. Увеличение пик-фактора при использовании цифровой фильтрации поднесущих частот даже на 1дБ несомненно приведет либо к увеличению внеполосных излучений, либо к снижению выходной мощности передатчика [14]. В работе [13] при использовании разработанного варианта эквалайзера в сочетании с большим числом антенн (более 100) на базовой станции показано, что в обратном канале вероятность ошибки на бит в случае использования FBMC приближается к эффективности классического варианта OFDM. То есть выигрыш, по сравнению с OFDM будет только по скорости передачи информации (около 7%) из-за отсутствия циклического префикса и по

уровню внеполосных излучений. Таким образом, технология OFDM не позволяет получить прорывных решений в области характеристик сигналов физического уровня для сетей 5G и 6G, и следует рассматривать альтернативные варианты построения групповых сигнальных конструкций, которые в сочетании с антеннами системами больших размерностей тоже возможно позволят существенно повысить эффективность каналов связи.

Литература

1. J. Tao, M. Umair, M. Ali, and J. Zhou. The impact of Internet of Things supported by emerging 5G in power systems: a review // CSEE Journal of Power and Energy Systems, vol.6, no. 2, 2019, pp. 344-352.
2. M. Shafiq, A. F. Molisch, P. J. Smith et al. 5G: a tutorial overview of standards, trials, challenges, deployment, and practice // IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 35, no. 6, 2017, pp. 1201-1221.
3. J. G. Andrews, S. Buzzi, W. Choi et al. What will 5G be? // IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 32, no. 6, 2014, pp. 1065–1082.
4. M. Agiwal, A. Roy, and N. Saxena. Next generation 5G wireless networks: a comprehensive survey // IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 18, no. 3, 2016, pp. 1617–1655.
5. K.B. Letaief, W. Chen, Y. Shi, J. Zhang, Y.A. Zhang. The roadmap to 6G: AI-empowered wireless networks // IEEE Commun. Mag., no. 57 (8) (Aug. 2019), pp. 84-90.
6. K.B. Letaief, W. Chen, Y. Shi, J. Zhang, Y.A. Zhang. The roadmap to 6G: AI-empowered wireless networks // IEEE Commun. Mag., no. 57 (8) (Aug. 2019), pp. 84-90.
7. T.S. Rappaport, Y. Xing, O. Kanhere et al. Trichopoulos Wireless communications and applications above 100 GHz: opportunities and challenges for 6G and beyond // IEEE Access, 7 (July 2019), pp. 78729-78757.
8. W. Saad, M. Bennis, M. Chen. A vision of 6G wireless systems: applications, trends, technologies, and open research problems. 2020, 10.1109/MNET.001.1900287.
9. Гришин И.В., Калинкина А.А. Обзор методов многочастотной модуляции сигналов в современных сетях беспроводной связи // Информационные технологии и коммуникации. Том 8. №2. С. 55-66, 2020.
10. Ворожищев И.В., Бочечка Г.С., Тихвинский В.О. Сравнительный анализ использования технологий UFMC и OFDM в сетях 5G // Электросвязь. №11, 2017. С. 46-51.
11. Трахтман А.М., Трахтман В.А. Основы теории дискретных сигналов на конечных интервалах. М.: Сов. Радио, 1975.
12. J.Nadal, C.A.Nour, A.Baghdadi. Hardware prototyping of FBMC/OQAM baseband for 5G mobile communication // IEEE Trans. Signal Process., vol. 50, pp. 1170–1183, May 2014.
13. H.Hosseiny, A.Farhang, B. Farhang-Boroujeny. FBMC Receiver Design and Analysis for Medium and Large Scale Antenna Systems. <https://arxiv.org/abs/2103.12806>, Mar 2021.
14. Горгадзе С.Ф., Смирнов А.В. Потенциальный КПД усилителей сложных композитных сигналов // Электросвязь. №2, 2016. С. 68-74.

EFFICIENCY OF MULTIPLE ACCESS OPTIONS FOR 5G AND 6G CELLULAR NETWORKS

SVETLANA F. GORGADZE

Moscow, Russia, svetlana-gorgadze@yandex.ru

ANASTASIA V. ERMAKOVA

Moscow, Russia, msikisylia@gmail.com

ABSTRACT

Introduction: IMT2020 (5G) networks can significantly improve the performance of previous generation mobile communication systems in terms of improving broadband multiple access (eMBB – enhanced Mobile Broadband) and providing ultra-reliable low-latency communication (URLLC – Ultra Low Latency Reliable Communication). The purpose of the work is to review and comparative analysis of multiple access technologies for promising mobile communication networks, which are based on OFDM. **Result:** The general principles of signal generation and processing when using variants of signals with OFDM using various methods of digital filtering of subcarrier frequencies are considered. For those OFDM options where a cyclic prefix may not be used (FBMC, UFMC), the possibility of increasing the information transfer rate is controversial, since the impulse responses of filters, for example, with FBMC, significantly exceed the duration of information signals, which increases intersymbol interference. **Practical significance:** The analysis of the general principles for constructing devices for generating and processing physical layer signals for OFDM variants with various methods of additional digital filtering of subcarrier frequencies shows that in all cases there is a significant complication of digital algorithms for generating and processing signals with a practical absence or in some cases a small gain (not more than (0.5-0.8) dB in relation to signal/noise) by the magnitude of the error per information bit. Based on the results of computer simulation, it is shown that OFDM technology and its variants do not allow obtaining breakthrough solutions in the field of physical layer signal characteristics for 5G and 6G networks, and alternative options for building group signal structures should be considered.

REFERENCES

1. J. Tao, M. Umair, M. Ali, and J. Zhou. (2019). The impact of Internet of Things supported by emerging 5G in power systems: a review. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, vol.6, no. 2, pp. 344-352.
2. M. Shafi, A. F. Molisch, P. J. Smith et al. (2017). 5G: a tutorial

KEYWORDS: orthogonal frequency division multiplexing, filter bank, sub-carrier frequency, digital sub-carrier filtering, sub-carrier group filtering, radio channel efficiency.

overview of standards, trials, challenges, deployment, and practice. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 35, no. 6, pp. 1201-1221.

3. J. G. Andrews, S. Buzzi, W. Choi et al. (2014). What will 5G be? *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 32, no. 6, pp. 1065-1082.

4. M. Agiwal, A. Roy, and N. Saxena. (2016). Next generation 5G wireless networks: a comprehensive survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 18, no. 3, pp. 1617-1655.

5. K.B. Letaief, W. Chen, Y. Shi, J. Zhang, Y.A. Zhang. (2019). The roadmap to 6G: AI-empowered wireless networks. *IEEE Commun. Mag.*, no. 57 (8) (Aug. 2019), pp. 84-90.

6. K.B. Letaief, W. Chen, Y. Shi, J. Zhang, Y.A. Zhang. (2019). The roadmap to 6G: AI-empowered wireless networks. *IEEE Commun. Mag.*, no. 57 (8) (Aug. 2019), pp. 84-90.

7. T.S. Rappaport, Y. Xing, O. Kanhere et al. (2019). Trichopoulos Wireless communications and applications above 100 GHz: opportunities and challenges for 6G and beyond. *IEEE Access*, 7 (July 2019), pp. 78729-78757.

8. W. Saad, M. Bennis, M. Chen. (2020). A vision of 6G wireless systems: applications, trends, technologies, and open research problems. 2020, 10.1109/MNET.001.1900287.

9. I.V. Grishin, A.A. Kalinkina. (2020). Review of methods of multi-frequency signal modulation in modern wireless networks. *Information technologies and communications*. Vol. 8. No. 2. pp. 55-66.

10. I.V. Vorozhishchev, G.S. Bochechka, V.O. Tikhvinsky. (2017). Comparative analysis of the use of UFMC and OFDM technologies in 5G networks. *Elektrosvyaz*. No. 11, pp. 46-51.

11. A.M. Trakhtman, V.A. Trakhtmat. (1975). Fundamentals of the theory of discrete signals on finite intervals. Moscow: Sov. Radio.

12. J. Nadal, C.A. Nour, A. Baghdadi. (2014). Hardware prototyping of FBMC/OQAM baseband for 5G mobile communication. *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 50, pp. 1170-1183, May 2014.

13. H.Hosseiny, A.Farhang, B. Farhang-Boroujeny. (2021). FBMC Receiver Design and Analysis for Medium and Large Scale Antenna Systems. <https://arxiv.org/abs/2103.12806>, Mar 2021.

14. S.F. Gorgadze, A.V. Smirnov. (2016). Potential efficiency of amplifiers of complex composite signals. *Elektrosvyaz*. No. 2, pp. 68-74.

INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Svetlana F. Gorgadze, Professor, Doctor of Technical Sciences, MTUCI, Moscow, Russia

Anastasia V. Ermakova, PhD student, MTUCI, Moscow, Russia



doi: 10.36724/2409-5419-2022-14-2-27-35

МЕТОД ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОЙ РАБОТЫ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСПОЗНАВАНИЯ СОСТОЯНИЙ ОБЪЕКТОВ КОНТРОЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

ПАНКОВ

Алексей Владимирович¹

КРИБЕЛЬ

Александр Михайлович²

ЛАУТА

Олег Сергеевич³

ВАСИЛЬЕВ

Никита Алексеевич⁴

Сведения об авторах:

¹старший преподаватель Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского, кандидат военных наук, доцент, Санкт-Петербург, Россия, yvdspsb55@yandex.ru

²соискатель 32 кафедры Военной академии связи имени маршала Советского союза С.М. Буденного, Санкт-Петербург, Россия, nemo4ka74@gmail.com

³профессор кафедры Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова (ГУМРФ), д.т.н., Санкт-Петербург, Россия, laos-82@yandex.ru

⁴соискатель 32 кафедры Военной академии связи имени маршала Советского союза С.М. Буденного, Санкт-Петербург, Россия, vasn2020@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение: В настоящее время, в различных сферах государственного и регионального управления все более остро проявляются проблемы, связанные с необходимостью постоянного мониторинга ключевых параметров функционирования сложных объектов. Потребность в непрерывной актуализации знаний о функционировании объектов в виде формализованных моделей, в условиях непрерывно изменяющихся ситуационных условий исследуемых процессов, определяет необходимость использования новых технологий обработки данных при ведении информационно-аналитической работы. **Цель работы** заключается в разработке концептуального подхода к совершенствованию процессов информационно-аналитической работы при решении задач распознавания состояния частично наблюдаемых объектов управления с использованием методов машинного обучения. **Используемые методы:** реализованные в методах машинного обучения алгоритмы позволяют выявить в имеющихся исходных данных различные закономерности и отразить их в формируемой модели объекта контроля в виде параметров, а использование конечного автомата определяет содержание процессов проведения оперативных расчетов, реализуемых в различных ситуационных условиях, задаваемых текущей полнотой и достоверностью исходных данных. **Научная новизна** заключается в том, что предложенный метод определяет качественно новое содержание процессов обработки информации, а автоматизация процессов разработки и актуализации моделей объектов контроля создает условия для существенного расширения признакового пространства, учитываемого при ведении информационно-аналитической работы, а также обеспечивает возможность получения более достоверных результатов в интересах рационального управления сложными объектами и процессами. **Результат:** представленный метод позволяет оценить качество информационного решения при объединении результатов полученных с использованием методов машинного обучения. Основу предложенного подхода формирует способ агрегирования результатов неравноточного распознавания состояний объектов с использованием нескольких методов идентификации. **Практическая значимость:** представленный метод является универсальным и может быть применена в системах информационного обеспечения органов государственного управления при решении задач, связанных с обеспечением общественной безопасности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: идентификация состояний объектов, нейронные сети, нечеткая логика, вероятностный анализ, комплексная обработка, моделирование

Для цитирования: Панков А.В., Крибель А.М., Лаута О.С., Васильев Н.А. Метод по совершенствованию информационно-аналитической работы на основе комплексирования результатов распознавания состояний объектов контроля с использованием методов машинного обучения // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. 2022. Т. 14. № 2. С. 27-35. doi: 10.36724/2409-5419-2022-14-2-27-35

В соответствии с реализуемой Стратегией развития информационного общества в Российской Федерации на 2017–2030 годы, информационные и коммуникационные технологии стали частью современных управленческих систем во всех сферах государственного управления, обороны страны, безопасности государства и обеспечения правопорядка [1].

В настоящее время, в различных сферах государственного и регионального управления все более остро проявляются проблемы, связанные с необходимостью постоянного мониторинга ключевых параметров функционирования сложных объектов. Специфика решаемых задач связана с обеспечением общественной безопасности, оперативным выявлением возможных угроз и принятием эффективных управленческих решений по разрешению возникших кризисных ситуаций.

Так в интересах обеспечения комплексной безопасности Санкт-Петербурга с 2004 г. функционирует государственное казенное учреждение «Городской мониторинговый центр» (ГКУ ГМЦ), деятельность которого направлена на повышение уровня обеспечения общественной безопасности. Одним из основных направлений деятельности является круглосуточный мониторинг экстренных событий и нестандартных ситуаций на объектах города и в местах проведения массовых мероприятий. Для решения задач идентификации состояний объектов контроля во всех 18 районах Санкт-Петербурга установлено более 30 тысяч камер. В «зону ответственности» которых включены: наиболее сложные перекрёстки автомобильных дорог и оживлённые магистрали, городские парки и дворы спальных районов [2, 3].

Увеличение объемов информации, подлежащей учету, анализу и обобщению в интересах повышения эффективности принимаемых информационных решений, определяет необходимость внедрения автоматизированных технологии интеллектуальной обработки разнородных данных, оперативного моделирования вариантов решений, быстрой настройки инструментария на предметную область.

Активное развитие технических средств автоматизированного сбора информации, формирует новые возможности непрерывной актуализацией оперативной информации, используемой для принятия управленческих решений. В настоящий момент на улицах Петербурга установлено более 150 камер с функционалом интеллектуальной видео аналитики, реализующих нейросетевые технологии, для обработки видеоизображений в реальном времени. Реализованные программно-аппаратные решения обеспечивают решение задач: идентификации лиц, с программированием их биометрических моделей, распознавания государственных номерных знаков автотранспорта, фиксации оставленных предметов, выявления фактов возникновения различных чрезвычайных ситуаций, в том числе пожаров, и дорожно-транспортных происшествий.

Уже в настоящее время объемы разно форматной информации, генерируемой техническими устройствами регистрации, (видеопотоки с камер наблюдения, данные от устройств радиочастотной идентификации, спутниковых систем навигации, различного рода сенсоров и многое другое.) поражают воображение.

По оценкам западных компаний, специализирующихся в сфере индустрии информационных технологий (EMC, Cisco, IBM, Google) в 2012 году в мире было сгенерировано 2 зетабайта (2 тысячи миллиардов гигабайтов информации), а в 2022 году эта величина превысит 40 зетабайтов [4].

Обработать такие объемы информации без использования автоматизированных систем стало практически невозможным. Данное обстоятельство, обусловило появление значительного числа экспертных систем, представляющих собой сложные программные комплексы, аккумулирующие знания специалистов в конкретных предметных областях и тиражирующих имеющийся эмпирический опыт.

Другой вызов процессам организации информационно-аналитической работы, определен существенной изменчивостью исследуемых процессов. Так, значительное влияние на работу, технических устройств регистрации, оказывают такие ситуационные условия, как время суток, метеорологические условия, а также активно реализуемые злоумышленниками меры противодействия техническим средствам контроля.

Потребность в непрерывной актуализации знаний о функционировании объектов контроля в виде формализованных моделей, в условиях непрерывно изменяющихся ситуационных условий исследуемых процессов, определяет необходимость использования новых технологий обработки данных при ведении информационно-аналитической работы.

Используемые в процессе ведения информационно-аналитической работы экспертные системы, основанные на четко заданной взаимосвязи исходных данных и формируемых решений о состоянии объектов контроля, становятся малоэффективными.

Необходимость оперативной аналитической обработки значительного объема информации, характеризующегося существенной неопределённостью, вызванной неполнотой и возможной недостоверностью исходных данных, вследствие преднамеренных и непреднамеренных искажений, определяет потребность в использовании качественно новых интеллектуальных систем обработки информации.

В контексте современного восприятия, *интеллектуальной является* система, способная целеустремленно, в зависимости от состояния информационных входов, изменять не только параметры функционирования, но и сам алгоритм своего поведения, выбор которого зависит не только от текущего состояния информационных входов, но также и от предыдущих состояний системы [5, 6].

В отличие от экспертных систем, позволяющих автоматизировать процедуры вывода на четко заданных логических правилах, современные информационные технологии определяют возможности реализации автоматизированных процедур приобретения знаний – машинного обучения.

Машинное обучение – раздел теории искусственного интеллекта, описывающий методы формирования алгоритмов и на их основе программ, способных «обучаться» (накапливать опыт и корректировать алгоритм решения заданной задачи, посредством подстройки используемой модели исследуемого объекта).

Теоретическая возможность реализации интеллектуальной системы в информационно-аналитической работе осно-

вана на использовании конечного автомата, определяющего содержание процессов проведения оперативных расчетов, реализуемых в различных ситуационных условиях, задаваемых текущей полнотой и достоверностью исходных данных.

В качестве основных направлений реализации систем искусственного интеллекта в информационно-аналитической работе органов государственного управления, предлагается рассмотреть:

- автоматизацию процессов разработки и актуализации моделей объектов контроля;
- автоматизацию процессов ситуационной обработки данных в интересах повышения достоверности результатов информационно-аналитической работы.

Концептуальный подход к реализации методов машинного обучения, в интересах вскрытия (распознавания) состояний объектов контроля [7, 8], основывается на использовании эмпирических данных (прецедентов), в которых выявляются закономерности, позволяющие сформировать модели объектов.

Автоматизация процессов разработки и актуализации моделей объектов контроля формирует условия для существенного расширения признакового пространства, учитываемого при ведении информационно-аналитической работы. Определенная избыточность описания объекта в автоматически сформированных «образах» его состояний («эталонных образах состояний») реализуемая на этапе формирования модели объекта, определяет дополнительные возможности повышения результативности решения оперативных задач распознавания, осуществляемых в условиях высокой динамики изменения оперативной обстановки и определяемой ей неполнотой исходных данных.

Общую основу решения большинства задач распознавания состояния объекта определяет формализованная процедура сопоставления заданного множества возможных состояний объекта мониторинга $\{S_j\}_J$ и $X_{(L)} = \langle x_1, x_2, \dots, x_L \rangle$ – вектора признаков, используемых в модели для идентифи-

кации данных состояний, где J – число состояний объекта, а L – число признаков.

Содержание процесса формирования модели объекта контроля, заключается в установлении функциональной взаимосвязи, обеспечивающей отображение $X_{(L)} \rightarrow S_j: \tilde{d}_j = f(X_{(L)}; A_{(1)})$, где \tilde{d}_j – прогнозируемое значения меры «уверенности» в наблюдении S_j -го состояния объекта, определяемое на основе $f(X_{(L)}; A_{(1)})$ – функции, символизирующая отображение аргумента $X_{(L)}$ при заданных $A_{(1)}$ параметрах модели в значение S_j . Сформированная модель объекта ($X_{(L)} \rightarrow S_j: \tilde{d}_j = f(X_{(L)}; A_{(1)})$), определяет содержание расчетов проводимых при решении задач идентификации состояний (оперативных задач).

Общая схема этапов информационно-аналитической работы, связанных с реализацией методов машинного обучения в процессе идентификации состояний объектов контроля, представлена на рисунке 1.

Реализованные в методах машинного обучения алгоритмы позволяют выявить в имеющихся исходных данных различные закономерности и отразить их в формируемой модели объекта контроля в виде $A_{(1)}$ параметров. В отдельных случаях, в качестве количественной величины \tilde{d}_j значения прогнозируемой меры «уверенности» в наблюдении S_j -го состояния объекта контроля, может использоваться вероятность нахождения объекта в заданном состоянии при регистрации системы информационных признаков.

Качество исходных данных, определяемое их полнотой и достоверностью, определяет различную адекватность формируемой модели, объекту контроля и решаемой задаче распознавания. Предварительное оценивание качества модели, сформированной на основе методов машинного обучения, производится в процессе обучения с использованием тестового набора данных, а окончательное – непосредственно при оценивании результатов прогнозирования (рис. 1).

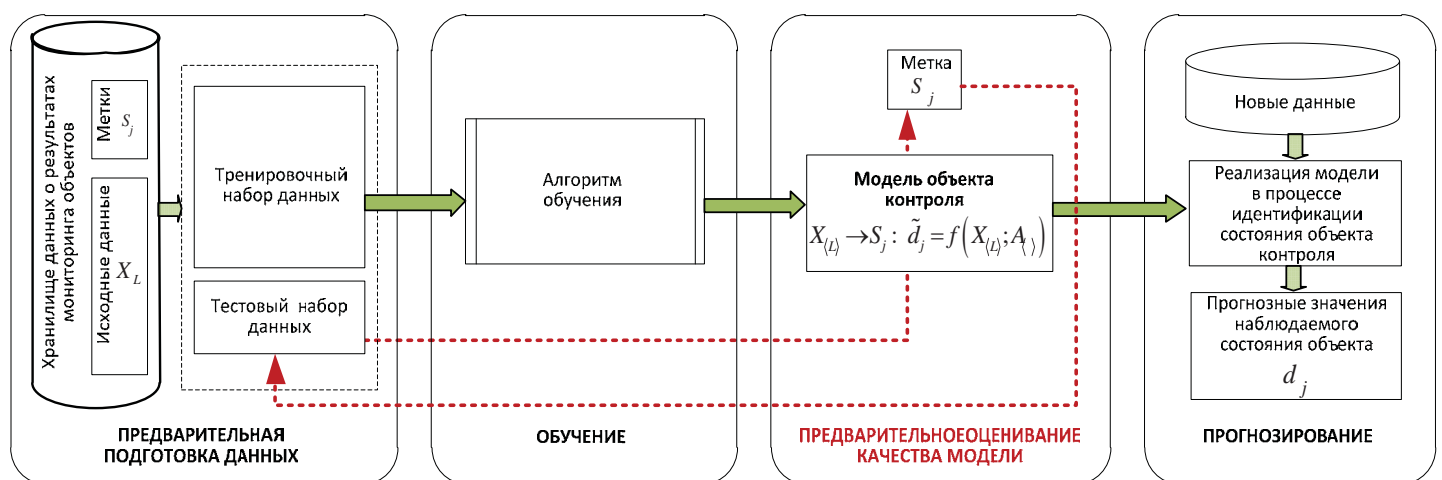


Рис. 1. Схема этапов информационно-аналитической работы, связанных с реализацией методов машинного обучения в процессе идентификации состояний объектов контроля

Накопленный в органах управления массив информации, характеризующей результаты наблюдения объектов контроля, определяет возможности для формирования размеченного массива исходных данных для реализации контролируемых методов машинного обучения, ориентированных на решение задачи распознавания (классификации), таких как: байесовские сети, деревья принятия решений, нейронные сети, К-ближайших соседей и др. [7, 8].

Поскольку в соответствии с используемыми на практике моделями, количество возможных состояний объекта контроля ограничено (он может находиться в S_j -х состояниях, $j=1(1)J$) и результат идентификации данных состояний может быть оценен на основе прогнозируемого d_j значения меры «уверенности» в наблюдении S_j -го состояния объекта, то результат реализации представленных методов может быть представлен в единой форме: $\{s_j, d_j\}$ – множества возможных состояний объекта контроля и соответствующих им значений мер уверенности.

Единство формы представления результатов идентификации состояния объекта с использованием различных методов определяет возможности связанные с их комплексным использованием в интересах повышения достоверности информационно-аналитической работы.

Результаты идентификации возможных состояний объекта контроля, оцененные в виде $d_{j,r}$ – значения меры «уверенности» в наблюдении S_j -го состояния объекта, полученные с использованием r -х методов идентификации ($r=1(I)R$) будут различны. Значения $d_{j,r}$ будут определяться содержанием реализованной в методе функции $f(X_{(L)}; A_{\diamond})$. Так, различные A_{\diamond} параметры модели объекта, сформированные на основе слабо формализованных знаний экспертов и в результате реализации описанных выше процедур машинного обучения, при единых значениях исходных данных ($X_{(L)}$), обеспечат получение различных значений мер «уверенности» в наблюдении S_j -го состояния.

Комплексный учет результатов неравноточной идентификации состояний объектов, полученных с использованием r -х методов, определяет условия для получения уточненного – агрегированного значения $d_{j,\Sigma}$ меры уверенности в достоверной идентификации возможных S_j -х состояний объекта мониторинга (далее по тексту – достоверность). Агрегирование результатов неравноточной идентификации направлено на компенсацию ошибок, присущих отдельным методам [9].

При этом, учет результатов прогнозирования наблюдаемого состояния, полученным с использованием отдельных методов, при формировании агрегированного вывода, основывается на расчете соответствующих k_r коэффициентов доверия. В качестве основы для количественной оценки коэффициента доверия к результатам реализации r -ого метода предлагается использовать, P_r – статистическую вероят-

ность правильного распознавания состояния объекта, рассчитанную на основе тестовой выборки данных (рис. 1 – этап «предварительное оценивание качества модели»).

Формализованное выражение для расчета коэффициента доверия, может быть рассчитано, как нормированное значение статистической вероятности правильного распознавания состояния объекта на основе r -го метода:

$$k_r = \frac{P_r}{\sum_{r=1}^R P_r}, k_r \in [0,1]. \quad (1)$$

Так, чем больше значение статистической вероятности правильного распознавания состояния объекта мониторинга с использованием метода, тем с большим весом необходимо учитывать полученный с его использованием результат при формировании обобщенного вывода о состоянии объекта.

Уточненное значение достоверности состояния объекта мониторинга, рассчитанное по результатам комплексного применения нескольких методов идентификации, представлено следующим выражением:

$$d_{j,\Sigma} = \sum_{r=1}^R k_r d_{j,r} / R, \quad d_{j,\Sigma} \in [0,1], \quad (2)$$

где $d_{j,\Sigma}$ – уточненное значение достоверности текущего S_j состояния, объекта мониторинга на основе комплексного использования r -х методов идентификации;

k_r – весовой коэффициент доверия результатам, полученным с использованием r -го метода идентификации;

$d_{j,r}$ – прогнозные значения достоверности нахождения объекта в S_j состоянии, полученное с использованием r -го метода идентификации.

Обобщенная схема способа комплексирования результатов неравноточной идентификации состояний объектов контроля, представлена на рисунке 2.

Рассчитанное на основе комплексного применения методов идентификации $\{d_{j,\Sigma}\}_J$ множество значений достоверности

возможных S_j состояний объекта контроля, формируют новые исходные данные для принятия решения о его текущем состоянии. Выражение, определяющее содержание принимаемого решения, может быть формализовано в следующем виде:

$$s_j : j = \arg \max(d_{j,\Sigma}), \quad j = 1(1)J \quad (3)$$

Обобщенное решение о состоянии объекта контроля принимается в соответствии с максимальным значением достоверности распознанных состояний.

С целью апробации предложенного способа комплексирования результатов неравноточной идентификации состояний объектов контроля, проведена серия имитационных экспериментов, целью которой являлось оценивание результативности использования предложенного способа по отношению к результатам, полученных с раздельным использованием методов.

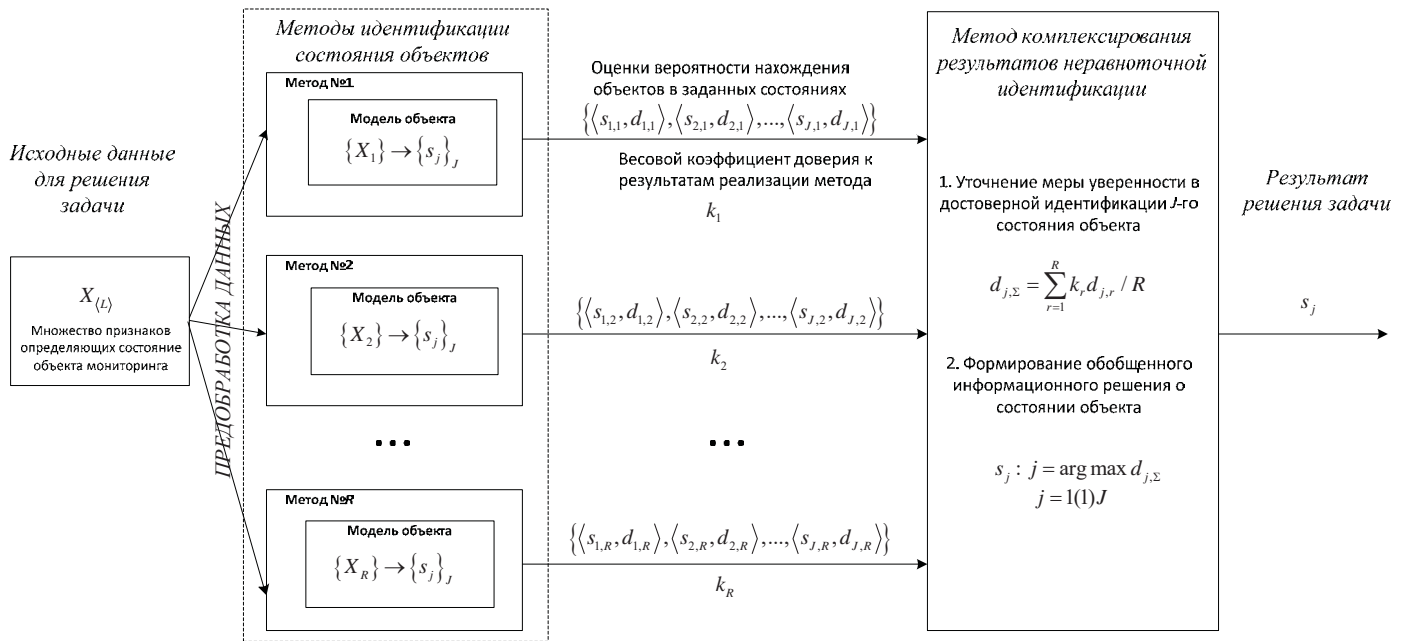


Рис. 2. Схема способа комплексирования результатов неравноточного распознавания состояния объекта контроля

Сравнению в ходе проведенного имитационного эксперимента подлежали следующие методы распознавания:

r_1 – метод распознавания, основанный на расчете меры близости наблюдаемого образа объекта с эталонным образом, с использованием расстояния Хемминга [10] (без реализации процессов машинного обучения);

r_2 – метод распознавания, основанный на реализации нейросетевой технологии идентификации состояния объекта [11] (машинное обучение);

r_3 – метод распознавания, основанный на реализации технологии идентификации состояния объекта с использованием «деревьев решений» [12] (машинное обучение);

r_2 – метод распознавания, основанный на комплексировании результатов неравноточной идентификации состояний объекта контроля.

При проведении экспериментов использовались отчеты по результатам экологического мониторинга десяти объектов промышленности, на которых были выявлены нештатные и аварийные ситуации, определившие нарушения экологической обстановки [13].

На основе исследуемых отчетов, общий объем которых составил 1000 ед., сформирована выборка данных. Нарушения экологической обстановки фиксировались на основе замеров 26 параметров ДЗЗ. Множество состояний объектов мониторинга включало три состояния: s_1 – «функционирование объекта, без нарушения экологических норм», s_2 – «функционирование объекта, с нарушениями, определяющими угрозу экологии», s_3 – «аварийное функционирование объекта, определяющего угрозу экологической безопасности».

Данная модель, определила основу для моделирования процессов интеллектуальной обработки данных при решении задачи идентификации состояния объекта контроля в условиях неполноты исходных данных. Поскольку значения фактических исходных данных, поступающих в систему обработки, представляют собой, некоторые искаженные образы представленных в модели эталонных состояний объекта. А доля (δ), возможных искажений в наблюдаемом образе состояния от эталонного, по результатам проведенного анализа фактических данных составляет от 0 до 30%, то моделирование исходных данных для обучения, осуществлялось с учетом данного ограничения.

Так, формирование выборки данных для предварительного тестирования результативности методов распознавания в условиях неполноты данных, осуществлялось посредством случайного (рандомного) изменения заданной доли ($0 \leq \delta \leq 30\%$) значений x_i элементов вектора признаков ($X_{(L)}$) эталонных состояний объекта контроля, представленных в модели объекта. Выбор образа состояния и порядковые номера информационных признаков, подлежащих искажению, осуществлялись случайным образом, при этом значение образа состояния объекта сохранялось в качестве метки.

Состав сформированной выборки данных для тестирования может быть представлен множеством $\left\{ \left\langle X'_{(26)}, s_i \right\rangle \right\}_{100}^{\delta}$, включающим 100 векторов – образов, каждый из которых включает 26 значений информационных признаков, искаженных в соответствии с заданной долей (δ) значений и 1 метку состояния.

Результаты предварительного тестирования результативности метода распознавания, основанного на расчете меры близости наблюдаемого образа объекта, с эталонным обра-

зом, рассматриваемого в качестве основного метода, получившего практическую реализацию для решения рассматриваемой задачи, определили 100% значение доли верно распознанных состояний объектов на сформированной выборке данных.

В интересах, предварительного тестирования методов, основанных на машинном обучении, с учетом принятых ограничений ($0 \leq \delta \leq 30\%$), осуществлено моделирование другой выборки данных. Общий объем, сформированной с использованием описанного способа «частично искаженных» (до 30%) векторов признаков ситуаций, составил 1000 значений. При этом, каждая моделируемая ситуация была размечена (проиндексирована) в соответствии с номером эталонного образа S_j состояния объекта, подвергнутого искажению.

Состав сформированной выборки данных для машинного обучения может быть представлен множеством $\left\{ \left\langle X'_{(26)}, S_i \right\rangle \right\}_{1000}^{\delta}$, включающим 1000 векторов – образов, каждый из которых включает 26 значений информационных признаков, искаженных в соответствии заданной (δ) долей значений и 1 метку состояния.

В дальнейшем, в соответствии с основными правилами реализации машинного обучения [4], данная выборка разделялась на два подмножества данных, в следующем соотношении: 90% – данные используемые в процессе обучения, 10% – данные для предварительного тестирования качества обучения.

Экспериментальная часть исследования, связанная с априорным оцениванием результативности решения рассматриваемой задачи идентификации состояний объекта, на основе сформированной выборки данных для машинного обучения, осуществлялись с использованием открытых программных кодов, реализующих рассматриваемые технологии [14-16].

Применительно к решаемой задаче, лучшие результаты были получены для реализованной в эксперименте, нейросетевой технологии обработки данных, основанной на использовании трехслойной перцептронной сети, с 26 входными нейронами и тремя выходами, а также методе реализующим технологию построения «усеченных деревьев решений» («случайный лес») [13]. При этом, обучение нейросети, в интересах обеспечения устойчивого результата по решению рассматриваемой задачи распознавания на представленной выборке данных, осуществлялось в течении 60 эпох, а обучение в интересах реализации метода деревьев решений проводилось однократно.

Полученные результаты, также продемонстрировали высокую результативность решения задачи распознавания на тестовой выборке (99-100% – доля верно распознанных состояний).

Дальнейшее содержание проведенного имитационного эксперимента было направлено, на оценивание результативности рассматриваемых методов распознавания в условиях ухудшения качества исходных данных, а также оценивания возможностей комплексирования результатов неравноточной идентификации состояний объекта контроля.

Для этого, в соответствии с описанным выше подходом, основанном на внесении определенной δ доли искажений в эталонные образы состояний, было осуществлено имитационное моделирование шести размеченных выборок данных для тестирования: 1 – соответствует ситуации, когда в моделируемый вектор – образ, может содержать от 0 до 40% ($\bar{\delta} = 20\%$) искаженных значений; 2 – от 0 до 50% ($\bar{\delta} = 25\%$); 3 – от 0 до 60% ($\bar{\delta} = 30\%$); 4 – от 0 до 70% ($\bar{\delta} = 35\%$); 5 – от 0 до 80% ($\bar{\delta} = 40\%$); 6 – от 0 до 90% ($\bar{\delta} = 45\%$).

Данные выборки, последовательно использовались для решения задачи распознавания на основе каждого из рассматриваемых методов. По результатам решения задачи распознавания состояний объектов, осуществлялось оценивание m_r доли достоверно идентифицированных состояний объектов контроля.

Проведенные на основе единых исходных данных расчеты, обеспечили различную результативность решения задачи распознавания состояний объектов (табл. 1).

Полученные результаты, характеризующие среднюю долю верно распознанных состояний объектов, в моделируемых условиях ухудшения качества исходных данных, определяют значения P_r статистической вероятностей правильного распознавания состояния объекта с использованием метода. Полученные вероятности, в дальнейшем, определили значения k_r -х весовых коэффициент доверия результатам, полученным с использованием r -го метода идентификации, рассчитываемых в соответствии с выражением (1). В результате проведенных расчетов, коэффициенты приняли значения: $k_{r_1} = 0,32$, $k_{r_2} = 0,34$, $k_{r_3} = 0,33$.

Таблица 1

Результаты оценивания достоверности распознавания состояний объекта контроля, в условиях моделируемой неполноты данных

Метод распознавания	Средняя доля искажений, вносимые в эталонные образы состояний, при формировании выборки данных для тестирования						Средняя доля верно распознанных состояний
	$\bar{\delta} = 20\%$	$\bar{\delta} = 25\%$	$\bar{\delta} = 30\%$	$\bar{\delta} = 35\%$	$\bar{\delta} = 40\%$	$\bar{\delta} = 45\%$	
r_1 (мера близости Хеминга)	100%	100%	86%	60%	33%	3%	63,7
r_2 (машинное обучение, нейронная сеть)	100%	99%	92%	71%	37%	6%	67,5
r_3 (машинное обучение, дерево решений)	99%	97%	85%	65%	34%	15%	65,8

Полученные при реализации каждого из методов прогнозные значения наблюдаемых состояний объектов и определенные k_r -е весовые коэффициент доверия результатам, определили возможность реализации, описанного выше, r_2 метода распознавания, основанного на комплексировании результатов неравноточной идентификации состояний объекта контроля.

В ходе его реализации, для каждого из представленных для тестирования выборок данных, вектора-образа ($\left\langle X'_{(26)}, S_i \right\rangle$) в соответствии с выражением (2), осуществлен

перерасчет прогнозируемой $d_{j,s}$ достоверности (меры уверенности) наблюдаемого состояния.

Результаты серии имитационных экспериментов по оцениванию результативности предложенных методов идентификации состояний объектов контроля, представлены на рисунке 3.

Полученные результаты свидетельствуют о реализуемости и практической значимости предложенного подхода для совершенствования информационно-аналитической работы. Результаты имитационного эксперимента, продемонстрировали высокую результативность (97-100% достоверной идентификации состояний объектов) в условиях достаточной полноты исходных данных (моделируемой 20-25% средней доли измененных значений признаков в тестовом наборе данных). Кроме того, полученные результаты демонстрируют, значительное снижение результативности каждого из методов, при их реализации в условиях возрастающей неполноты данных.

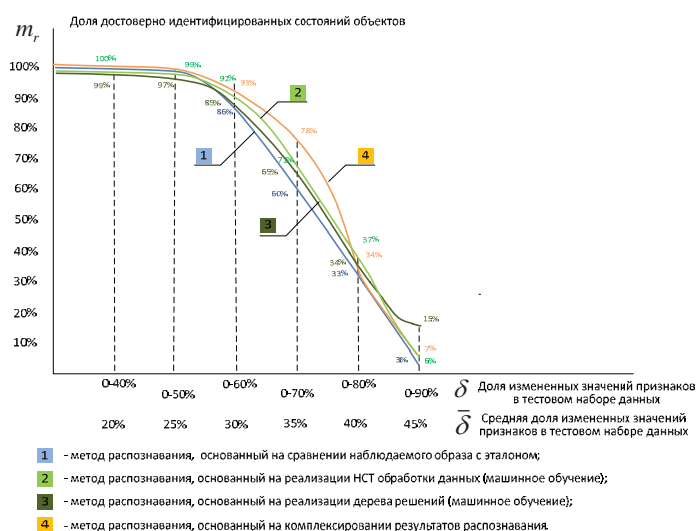


Рис. 3. Результаты имитационных экспериментов по оцениванию качества методов идентификации состояний объектов контроля

Вместе с тем, на примере рассмотренной задачи, полученные результаты наглядно демонстрируют преимущества реализации подхода, связанного с комплексированием результатов неравноточной идентификации состояний объектов мониторинга. Так, результаты апробации предложенного гибридного метода, обеспечили 7-18% повышение доли верно идентифицированных состояний объектов контроля по отношению к результатам, полученным на основе традиционно используемых, при ведении информационно-аналитической работы, методов распознавания.

Заключение

Эффективная реализация осуществляемых в настоящее время преобразований системы информационного обеспечения органов государственного управления при решении задач, связанных с обеспечением общественной безопасности, в значительной степени связана с совершенствованием процессов информационно-аналитической работы.

Описанный в статье метод по совершенствованию информационно-аналитической работы на основе комплексирования результатов распознавания состояний объектов контроля с использованием методов машинного обучения определяет качественно новое содержание процессов обработки информации. Автоматизация процессов разработки и актуализации моделей объектов контроля создает условия для существенного расширения признакового пространства, учитываемого при ведении информационно-аналитической работы, а предложенный способ агрегирования результатов неравноточной идентификации состояний, обеспечивает возможность получения более достоверных результатов, в интересах рационального управления сложными объектами и процессами.

Литература

1. Указ Президента РФ от 9 мая 2017 г. № 203 “О Стратегии развития информационного общества в Российской Федерации на 2017-2030 годы”.
2. Официальный сайт Санкт-Петербургского государственного казенного учреждения «Городской мониторинговый центр», интернет ресурс: <https://gu.spb.ru>, дата обращения 15.07.2021 г.
3. Новостной сайт Санкт-Петербургского государственного казенного учреждения «Городской мониторинговый центр», Статья: В систему видеонаблюдения Петербурга внедрили технологию распознавания лиц, дата размещения 30.11.2018 г. интернет ресурс: <https://spb112.ru>, дата обращения 15.07.2019 г.
4. Савельев А.И. Проблемы применения законодательства о персональных данных в эпоху «Больших данных» (Big Data) // Право. Журнал Высшей школы экономики. 2015. №1. С. 43-66.
5. Замятин А.В. Интеллектуальный анализ данных: учеб. пособие. Томск: Издательский Дом Томского государственного университета, 2016. 120 с.
6. Смолин Д.В. Введение в искусственный интеллект: конспект лекций; под общ. ред. Е.Н. Глебова. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. 208 с.
7. Ясницкий Л.Н. Искусственный интеллект. Электронный ресурс: учебное пособие. Эл. изд. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. 197 с.
8. Воронина В.В., Михеев А.В., Ярушкина Н.Г., Святлов К.В. Теория и практика машинного обучения: учебное. Ульяновск: УлГТУ, 2017. 290 с.
9. Попело В.Д., Ванеева М.В. Теория математической обработки геодезических измерений. Ч 2. Оценивание результатов геодезических измерений и их погрешностей на основе вероятностных представлений / учебное пособие. Воронеж: ВГАУ, 2015. 138 с.
10. Леских А.Е., Броневич А.Г. Математические методы распознавания образов: Курс лекций. Таганрог: Изд. ТТИ ЮФУ, 2009. 154 с.
11. Николенко С., Кадурын А., Архангельская Е. Глубокое обучение. Погружение в мир нейронных сетей. СПб: Питер, 2018. 480 с.
12. Штукатуров С. Реализация и разработка алгоритма «случайный лес» с использованием языка программирования Статья. Интернет ресурс: www.tproger.ru/translations/python-random-forest-implementation/ Дата опубликования: 14.17.2019.
13. Панков А.В., Девяткин А.М. Комплексирование методов информационно-аналитической работы для повышения качества информационных решений // Труды ВКА А.Ф.Можайского, Выпуск 678. СПб.: ВКА им.А.Ф.Можайского, 2021. С. 78-87.
14. Официальный сайт ООО «Нейронные технологии», Интернет ресурс: <https://neural-technologies.com>, дата посещения: 21.12.21.
15. Официальный сайт ООО «BaseGroupLab», NeuralBase – нейронная сеть за 5 минут. Интернет ресурс: <http://basegroup.ru>, дата обращения: 21.12.21.
16. Открытый интернет ресурс облачного сервиса «Google Colaboratory». Интернет ресурс: <https://colab.research.google.com>, дата обращения: 25.12.21.

METHOD FOR IMPROVING INFORMATION AND ANALYTICAL WORK BASED ON THE INTEGRATION OF THE RESULTS OF RECOGNITION OF THE STATES OF CONTROL OBJECTS USING MACHINE LEARNING METHODS

ALEXEY V. PANKOV

St. Petersburg, Russia, yvdspsb55@yandex.ru

ALEXANDER M. KRIBEL

St. Petersburg, Russia, nemo4ka74@gmail.com

OLEG S. LAUTA

St. Petersburg, Russia, laos-82@yandex.ru

NIKITA A. VASILIEV

St. Petersburg, Russia, vasn2020@mail.ru

KEYWORDS: *identification of object states, neural networks, fuzzy logic, probabilistic analysis, complex processing, modeling*

ABSTRACT

Introduction: Currently, in various spheres of state and regional management, problems related to the need for constant monitoring of key parameters of the functioning of complex facilities are becoming more acute. The need for continuous updating of knowledge about the functioning of objects in the form of formalized models, in the conditions of continuously changing situational conditions of the processes under study, determines the need to use new data processing technologies when conducting information and analytical work. **The purpose of the work** is to develop a conceptual approach to improving the processes of information and analytical work in solving problems of recognizing the state of partially observed control objects using machine learning methods. **Methods used:** the algorithms implemented in machine learning methods allow us to identify various patterns in the available source data and reflect them in the generated model of the object of control in the form of parameters, and the use of a finite automaton determines the content of the processes of operational calculations implemented in

various situational conditions set by the current completeness and reliability of the source data. **The scientific novelty** lies in the fact that the proposed method determines a qualitatively new content of information processing processes, and automation of the processes of developing and updating models of control objects creates conditions for a significant expansion of the feature space taken into account when conducting information and analytical work, and also provides the opportunity to obtain more reliable results in the interests of rational management of complex objects and processes. **Result:** the presented method makes it possible to evaluate the quality of the information solution when combining the results obtained using machine learning methods. The basis of the proposed approach is formed by the method of aggregating the results of non-precision recognition of the states of objects using several identification methods. **Practical significance:** the presented method is universal and can be applied in information support systems of public administration bodies in solving problems related to ensuring public safety.

REFERENCES

1. Decree of the President of the Russian Federation No. 203 dated May 9, 2017 "On the Strategy for the Development of the Information Society in the Russian Federation for 2017-2030". (In Russian)
2. Official website of the St. Petersburg State State Institution "City Monitoring Center", URL: <https://gu.spb.ru>, (date of access 15.07.2021) (In Russian)
3. News site of the St. Petersburg State-owned institution "City Monitoring Center", Article: Face recognition technology was introduced into the video surveillance system of St. Petersburg, date of placement 30.11.2018 Internet resource: <https://spb112.ru>, accessed 15.07.2019.
4. Saveliev A.I. (2015). Problems of application of legislation on personal data in the era of "Big Data" (Big Data). *Pravo. Journal of the Higher School of Economics*. No. 1, pp. 43-66. (In Russian)
5. Zamyatin A.V. (2016). Intellectual data analysis: textbook. stipend. Tomsk: Publishing House of Tomsk State University. 120 p. (In Russian)
6. Smolin D.V. (2004). Introduction to artificial intelligence: lecture notes. under the general editorship of E.N. Glebova. Moscow: FIZMATLIT. 208 p. (In Russian)
7. Yasniyskiy L.N. (2012). Artificial intelligence. Electronic resource: textbook. Moscow: BINOM. Laboratory of Knowledge. 197 p.
8. Voronina V.V., Mikheev A.V., Yarushkina N.G., Svyatov K.V. (2017). Theory and practice of machine learning: a textbook. Ulyanovsk. 290 p. (In Russian)
9. Popelo V.D., Vaneeva M.V. (2015). Theory of mathematical processing of geodetic measurements. H 2. Evaluation of the results of geodetic measurements and their errors based on probabilistic representations. Voronezh: VGU. 138 p. (In Russian)
10. Lepskikh A.E., Bronevich A.G. (2009). Mathematical methods of pattern recognition: A course of lectures. Taganrog: Publishing House of TTI SFU. 154 p. (In Russian)

11. Nikolenko S., Kadurin A., Arkhangelskaya E. (2018). Deep learning. Immersion into the world of neural networks. St. Petersburg: Peter. 480 p. (In Russian)

12. Plasterers With the implementation and development of the algorithm "random forest" using the programming language Article. Online resource: [www.tproger.ru / translations/ python-random-forest-implementation](http://www.tproger.ru/translations/python-random-forest-implementation). Publication date: 14.17.2019. (In Russian)

13. Pankov A.V., Devyatkin A.M. (2021). Integration of methods of information and analytical work to improve the quality of information solutions. *Proceedings of A.F. Mozhaysky Military-Space*

Academy, Issue 678. St. Petersburg: A.F. Mozhaysky Military-Space Academy, pp. 78-87. (In Russian)

14. Official website of Neural Technologies LLC", URL: <https://neural-technologies.com> (date of access: 12.21.21).

15. Official website of BaseGroupLab LLC, NeuralBase - neural network in 5 minutes. URL: <http://basegroup.ru> (date of access: 21.12.21).

16. Open Internet resource of the cloud service "Google Colaboratory". URL: <https://colab.research.google.com> (date of access: 25.12.21).

INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Pankov A.V., lecturer at the Military Space Academy named after A.F.Mozhaysky, a candidate of military sciences, associate professor, St. Petersburg, Russia

Kribel A.M., candidate of the 32 department of the Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny, St. Petersburg, Russia

Lauta O.S., professor of the Department of Admiral S.O. Makarov State University of Marine and River Fleet, Doctor of Technical Sciences, St. Petersburg, Russia

Vasiliev N.A., candidate of the 32 department of the Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny, St. Petersburg, Russia

For citation: Pankov A.V., Kribel A.M., Lauta O.S., Vasiliev N.A. Method for improving information and analytical work based on the integration of the results of recognition of the states of control objects using machine learning methods. *H&ES Research*. 2022. Vol. 14. No. 2. Pp. 27-35. doi: 10.36724/2409-5419-2022-14-2-27-35 (In Rus)

12+

26–29
апреля
2022

Россия, Москва,
ЦВК «ЭКСПОЦЕНТР»

**Российская неделя
высоких технологий
РНВТ**

www.hi-techweek.ru

СВЯЗЬ
34-я международная
выставка
информационных
и коммуникационных
технологий
www.sviaz-expo.ru

НАВИТЕХ
Экспозиция
«Навигационные
системы,
технологии и услуги»
www.navitech-expo.ru

• Форум
«СВЯЗЬ-2022»

• Форум «Российский софт:
эффективные решения»

МОДУЛЬ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПОДДЕРЖКЕ НАУКОЕМКИХ ПРОИЗВОДСТВ

КОЗЛОВ

Сергей Витальевич¹

КУБАНКОВ

Александр Николаевич²

ШАБАНОВ

Александр Петрович³

АННОТАЦИЯ

Введение: Предприятия наукоемких производств электронной, машиностроительной и других отраслей экономики, с одной стороны, и исследовательские центры академических, прикладных и образовательных учреждений, с другой стороны, производят встречный поиск. Целью такого поиска является определение исследований, которые востребованы отраслевыми предприятиями для ведения проектов и производства высокотехнологической продукции, и нахождение адресов предприятий, которые востребованы исследовательскими учреждениями для сбыта своей научной и инновационной продукции. Практика показывает, что мероприятия по поиску целевой информации осуществляются в течение ограниченного времени и, как правило, на первых этапах проекта. При таком подходе имеющаяся информация подчас не успевает дойти до своего потребителя вовремя. Похожая ситуация наблюдается и во встречном поиске. Учреждения, как правило, ограничены в силах и средствах, которые требуются при проведении поиска потенциальных потребителей для результатов своих исследований и при проведении договорных мероприятий. **Цель работы:** Для оперативности принятия решения по ведению проектов наукоемких производств, в частности, роботизированных систем, за счет своевременного оснащения предприятий востребованной ими информацией о результатах исследований решается задача о построении модуля принятия решений по интеллектуальной поддержке таких проектов. Целеполаганием данного модуля является обеспечение интенсификации процессов своевременной доставки информации о новых знаниях в области наукоемких производств на предприятия-производители микросистемных компонентов, приборов и на предприятия-разработчики роботизированных систем. Базовой основой модуля принятия решений, обладающая новизной, является его архитектурная модель, построенная для реализации процесса автоматического распознавания адреса предприятия, являющегося потенциальным потребителем результатов нового исследования, и процесса передачи данных об этих результатах в соответствии с адресом для использования в проектах по разработке новых электронных компонентов и по производству на их базе роботизированных систем.

Сведения об авторах:

¹к.т.н., с.н.с., руководитель отделения, Федеральный исследовательский центр "Информатика и управление" РАН, Москва, Россия, skozlov@ipiran.ru

²д.в.н., профессор, заведующий кафедрой, Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия, a.n.kubankov@mtuci.ru

³д.т.н., с.н.с., ведущий научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр "Информатика и управление" РАН, Москва, Россия, arshabanov@mail.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: наукоемкие производства, проекты, процессы обработки и передачи данных, инфокоммуникационные системы, роботизированные системы

Для цитирования: Козлов С.В., Кубанков А.Н., Шабанов А.П. Модуль принятия решений по интеллектуальной поддержке наукоемких производств // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. 2022. Т. 14. № 2. С. 36-43. doi: 10.36724/2409-5419-2022-14-2-36-43

Введение

Представляемая работа является продолжением исследований [1-3], посвящённых системам управления действиями роботизированных систем в различных отраслях экономики и сферах управления. Общим свойством представленных в них методов и моделей является использование модулей принятия решений по интеллектуальной поддержке сценариев (проектов) решений на основе семантических баз данных.

Задачей настоящего исследования является разработка архитектурной модели для модуля принятия решений по интеллектуальной поддержке проектов наукоёмких производств, в том числе, проектов перспективного приборостроения, включая проекты роботизированных систем.

Основным проблемным вопросом производственно-технологического характера, к которому относится поставленная задача, является дефицит современного российского производственного, контрольно-измерительного и испытательного оборудования, что оказывает существенное влияние на освоение производства конкурентоспособной высокотехнологичной электронной продукции. Имеются проблемы обеспечения организаций отрасли отдельными видами полупроводниковых материалов, эпитаксиальных структур, специальных материалов, а также российскими средствами автоматизированного проектирования, системным программным обеспечением и системами управления базами данных. Так, мелкосерийное производство изделий не обеспечивает внедрение новых разработок и в ряде случаев делает невозможным создание их рентабельного производства.

Поставленная задача решается с учётом современных возможностей по выполнению следующих мероприятий в исследовательских, инновационных и проектных циклах:

- создание технологического задела в виде программно-аппаратных комплексов, обеспечивающих реализацию технологий семантических баз данных и искусственного интеллекта, компонентов робототехники, беспроводной связи, виртуальной и дополненной реальности;

- обеспечение доступности современных средств проектирования и производства, в том числе через создание и развитие инфраструктуры совместного использования посредством цифровых платформ федерального, регионального и отраслевого;

- масштабирование интеллектуальных (научных, образовательных, исследовательских), производственных и инженерных ресурсов, осуществляемое на основе объединения организационных систем в транспозиционных структурах – кластерах, конгломерациях и других;

- выполнение поиска, структурирования и обработки информации, размещённых в отраслевых базах данных, в том числе, об аппаратуре, электронной компонентной базе, компетенциях субъектов, отчётах НИР и ОКР, технических и рабочих проектах, отечественных, национальных и международных электронных библиотеках и патентных ведомствах;

- анализ информации о мероприятиях, относящихся к наукоёмким производствам, и приведённой в публикациях об основополагающих документах федеральных проектов «Информационная инфраструктура», «Цифровые технологии»,

«Цифровое государственное управление», Программа фундаментальных научных исследований в Российской Федерации на долгосрочный период (2021-2030 годы) и др.

Анализ отношений в известных транспозиционных структурах [4-19] и в моделях взаимосвязей элементов маршрутов передачи данных в семантических базах знаний, аутентификации субъектов взаимодействия, методов обработки и анализа данных [20-26] обусловил выбор направления разработки архитектурной модели для модуля принятия решений в виде многодисциплинарной и многоотраслевой цифровой платформы для интеллектуальной поддержки организационных систем в транспозиционной структуре.

Назначением (целеполаганием) разработанной модели модуля принятия решения является централизованное обеспечение интенсификации взаимодействий между учреждениями-источниками исследований, с одной стороны, предприятиями-производителями микроселектронных компонентов, приборов и предприятиями-разработчиками роботизированных систем, с другой стороны.

Новизна модели заключается в наличии процесса *автоматического* распознавания адреса организационной системы, являющейся в транспозиционной структуре потенциальным потребителем результатов исследования, и передачи данных об исследовании в соответствии с адресом для проектирования и производства высокотехнологичной продукции.

Предпосылки к созданию модуля принятия решений в виде цифровой платформы

1. Работаемый модуль относится к вычислительным комплексам и компьютерным сетям. Областью применения являются системы поддержки организационных систем по производству высокотехнологичной продукции с использованием данных об исследованиях.

2. Социально-экономический курс на выполнение национальных программ, федеральных и региональных проектов предопределил тенденцию увеличения числа организационных систем, как проводящих исследования, так и потребляющих их результаты. При этом, наряду с ведомственными, отраслевыми и корпоративными организационными системами, всё больше появляется малых и средних предприятий, инновационных центров, которые осуществляют взаимодействие с крупными предприятиями в транспозиционных структурах, агрегациях.

3. Рост числа транспозиционных структур с технологиями, объединяющими ресурсы учреждений и предприятий различных форм собственности и обеспечивающих их информационное взаимодействие, обусловили актуальность решения задачи по централизованному воспроизводству процессов передачи данных об исследованиях с применением цифровой платформы, как посредника в передаче данных об исследованиях.

В работе используются общеизвестные и следующие термины и их определения.

Организационная система – промышленное или аграрное предприятие, научное учреждение, образовательная организация, инвестиционный фонд, подразделение органа власти или ведомства..., осуществляющее деятельность в составе

транспозиционной структуры с целеполаганием на прибавочную стоимость или на выполнение государственного или иного заказа, на выполнение проекта (проектов).

Транспозиционная структура представляет собой объединение территориально разнесённых организационных систем – производителей исследований и их потенциальных потребителей, которые осуществляют взаимодействие с цифровой платформой посредством информационно-телекоммуникационной сети, включая Интернет. Примеры транспозиционных структур: кластер – вид транспозиционных структур в отраслях экономики субъектов РФ, который является перспективной формой территориальной организации производства и социально-экономического развития региона; коллаборация – вид транспозиционных структур, как объединений экономических субъектов с целью достижения максимально возможной эффективности, в процессах деятельности члены коллаборации обмениваются знаниями, согласовывают свои решения и координируют свои действия; конгломерация – вид транспозиционных структур, как скопления отдельных населенных пунктов, имеющих свои четко выраженные границы и не стремящихся к территориальному срастанию, но взаимодействующих и функционирующих как единый организм.

Клиент-серверные отношения – это архитектура отношений, при которой уровни регулируются протоколами, что дает возможность обеспечивать доступ клиентских программ к программе-серверу вне зависимости от типа операционной системы.

Результаты исследований – новые знания о законах развития природы, общества, технические решения – изобретения, полезные модели, программы для ЭВМ и базы данных, способствующие устойчивому научно-технологическому, социально-экономическому и культурному развитию.

Балансировка нагрузки – механизм распределения нагрузки – пакетов данных в трактах информационных систем, между вычислительными ресурсами. Это позволяет эффективно использовать ресурсы, сокращать время отклика и повышать удовлетворенность пользователей.

Анализ аналогов модуля принятия решений

Создаваемая модель модуля принятия решений об интеллектуальной поддержке проектов наукоёмких производств представляет собой экземпляр, относящийся к классу электронных сетевых моделей, построенных в семантических базах данных цифровых платформ. Примерами аналогов являются известные сетевые модели [27-29].

В результате проведенного анализа моделей-аналогов определены следующие их свойства, которые оказали влияние на поиск отличительного свойства (новизны) создаваемой модели модуля принятия решений.

– Система управления сквозными сервисами для мультиплатформенных решений [27] собирает информацию высокого уровня, относящуюся к конкретной услуге, настраивает ее соответствующим образом и преобразует в выбранную платформу. Предлагаемая система тестируется с использованием Мобильного центрального офиса, перепроектирован-

ного в качестве Центра обработки данных (M-CORD) и оркестраторов управления и оркестровки с открытым исходным кодом (OSM). Система обеспечивает сокращение усилий конечного пользователя по созданию сетевых фрагментов и бесшовную сквозную оркестровку сервисов.

– Балансировщик нагрузки при наличии Служб в сети с именованными данными [28] реализует подход к балансировке нагрузки, основанный на применении маршрутизатора с сообщающимися сосудами, обеспечивает сокращение времени отклика службы и определяет возможности сервера без зондирования.

– Интегрированная система управления [29] обеспечивает передачу данных между системами управления с учётом различий в их аппаратно-программных комплексах и программных средствах. Как следствие, предоставляется возможность передачи данных из систем управления, размещённых в организационных системах, производящих исследований, в системы управления, размещённые в организационных системах, производящих высокотехнологичные продукты.

Общим свойством аналогов модуля принятия решений является наличие известных адресов для передачи данных об исследовании при отсутствии возможности *автоматического* распознавания адреса организационной системы, которая заинтересована в использовании результатов исследования для производства высокотехнологичной продукции.

Данное свойство обусловило появление идеи создания модели для модуля принятия решения с возможностью *автоматического* распознавания адреса организационной системы, являющейся в транспозиционной структуре потенциальным потребителем результатов исследования.

Архитектурная модель модуля принятия решения

Модуль принятия решений об интеллектуальной поддержке проектов наукоёмких производств воспроизводит следующие функции процесса автоматического распознавания адреса организационной системы.

– Функция приёма в вычислительном комплексе со входа цифровой платформы через интерфейс оборудования данные об исследовании, о его коде классификации и об адресе организационной системы, производившей это исследование.

– Функция приёма в вычислительном комплексе со входа цифровой платформы через интерфейс оборудования данные о коде классификации востребованного исследования и об адресе организационной системы, потенциальном потребителе результатов этого исследования.

– Функция размещения данных об исследовании и о его коде классификации в сегменте системы хранения данных, причём этот сегмент характеризуется адресом организационной системы, производившей это исследование.

– Функция размещения данных об адресе организационной системы, потенциальном потребителе результатов востребованного исследования, в сегменте семантической базы знаний, причём код адреса этого сегмента характеризуется кодом классификации востребованного исследования.

– Функция анализа данных о коде классификации исследования и данных о коде классификации востребованного

исследования, причём при равенстве этих данных обеспечивает копирование данных об исследовании в сегменте системы хранения данных, передачу их через интерфейс оборудования на выход цифровой платформы и далее через Информационно-телекоммуникационную сеть, включая Интернет, в организационную систему, потенциального потребителя результатов востребованного исследования, для производства высокотехнологичной продукции.

– При неравенстве данных о коде классификации исследования и данных о коде классификации востребованного исследования выполняется функция контроля над входом и, при поступлении на этот вход новых данных, причём как данных об исследовании, так и данных о востребованном исследовании, приведённые выше функции повторяются.

Архитектурная модель модуля принятия решений с возможностью реализации процесса автоматического распознавания адреса организационной системы построена на основе анализа и усовершенствования архитектуры устройства «Цифровая платформа поддержки процессов организационных систем» [30]. Архитектурная модель модуля принятия решений об интеллектуальной поддержке организационных систем приведена на рисунке 1.

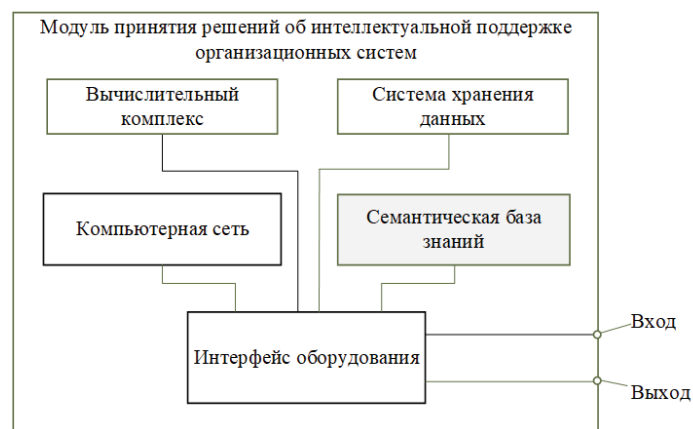


Рис. 1. Архитектурная модель модуля принятия решения об интеллектуальной поддержке организационных систем

Модуль принятия решений об интеллектуальной поддержке организационных систем (рис. 1) содержит: вычислительный комплекс, находящийся в клиент-серверных отношениях с вычислительными комплексами, размещёнными в организационных системах транспозиционной структуры; компьютеры, объединённые в компьютерную сеть; систему хранения данных; интерфейс оборудования; семантическую базу знаний; вход и выход.

Существенными отличительными признаками представленного модуля принятия решений от своих аналогов являются наличие в семантической базе данных сегментов данных, код адреса каждого из которых характеризуется одним из кодов классификации исследований, и наличие в системе хранения данных сегментов, код адреса каждого из которых характеризуется кодом адреса одной из организационных систем в транспозиционной структуре.

В качестве примера применения модуля принятия решения на рисунке 2 приведена структурная схема транспозиционной структуры, в состав которой введён данный модуль.



Рис. 2. Структурная схема транспозиционной структуры

На схеме (рис. 2) представлены Информационно-телекоммуникационная сеть транспозиционной структуры и организационные системы, входящие в её состав – научные учреждения, образовательные организации, прикладные научно-исследовательские институты (НИИ), научные лаборатории, предприятия сфер экономики, инновационные центры, федеральные и региональные учреждения. Эти организационные системы проводят исследования или производят продукцию, или то и другое. Работа модуля принятия решений (рис. 1) осуществляется во взаимодействии с организационными системами в транспозиционной структуре (рис. 2).

Технический результат, достигаемый при работе данного модуля в составе транспозиционной структуры, заключается в расширении функциональных возможностей за счёт автоматического распознавания адреса организационной системы, являющейся в транспозиционной структуре потенциальным потребителем результатов исследования, и передачи данных об исследовании в соответствии с адресом для производства высокотехнологичной продукции. Модуль принятия решений построен с применением клиент-серверной архитектуры отношений с вычислительными ресурсами организационных систем, причём вычислительные ресурсы программы-сервера размещены в модуле, а вычислительные ресурсы клиентских программ размещены в организационных системах.

Особенностью представляемой транспозиционной структуры является фактор взаимной обратимости результатов исследований между организационными системами. Так, организационные системы – источники исследований, могут быть потребителями результатов исследований, проведённых другими организационными системами, а организационные системы – потребители результатов исследований, могут быть источниками новых знаний, добытых опытным путём при создании новых технологий и производстве новой продукции.

Модель для балансировки нагрузки на модуль принятия решений

Модель для балансировки нагрузки на цифровую платформу описывает внутренние состояния в интервале времени, отводимом для этапа измерения нагрузки на модуль принятия решений в транспозиционной структуре (рис. 2). Целью балансировки является повышение гибкости, масштабируемости и управляемости вычислительных ресурсов, в

том числе, при использовании «облачного» режима их функционирования. Очевидно, что реализовать свойства гибкости виртуальной вычислительной среды к изменяющимся внешним условиям и, при этом остаться в рамках заданных требований, невозможно без создания эффективной системы контроля над ресурсами.

Анализ изменений числа пакетов данных, передаваемых в тракте передачи и обработки данных в течение непрерывных интервалов их занятости, позволил построить математическую модель состояния интервала занятости, которая определяет условие (границу) достаточности вычислительных ресурсов, образующих данный тракт:

$$P_{N_{dost.}}(J * t_{VIO} \leq T_{tr.}) = \left[\frac{1}{N_{dost.}} \sum_{j=0}^{N_{dost.}-1} \sum_{k=j+1}^{N_{dost.}} P_{N_{dost.}}^k(j) \right] \leq P_{tr.}(T \leq T_{tr.}), \quad (1)$$

где $N_{dost.}$ – число требований (пакетов данных) в интервале занятости, при превышении которого не соблюдается граничное условие модели (1):

$$P_{N_{dost.+1}}(J * t_{VIO} \leq T_{tr.}) > P_{tr.}(T \leq T_{tr.});$$

$T_{tr.}$ – допустимое время нахождения требования в интервале занятости;

J – максимальное число требований, находящихся в тракте, при котором время нахождения требования в интервале занятости не превышает допустимое время $T_{tr.}$;

t_{VIO} – длительность одного временного интервала обслуживания;

$P_{N_{dost.}}^k(j)$ – вероятность нахождения требования на позиции k в интервале занятости с общим числом требований $N_{dost.}$, в котором уже находится j требований.

Из (1) следует, что длительность временного интервала обслуживания является функцией от значения $T_{tr.}$ и J :

$$t_{VIO} \leq \frac{T_{tr.}}{J}.$$

В зависимости от типа инструментов контроля достаточно или измерить интервал занятости и сравнить с $N_{dost.}$, или измерить число требований в тракте и сравнить с J . Практическая реализуемость данного методического подхода, основанного на измерении интервалов занятости в тракте передачи и обработки данных, обеспечивается известными математическими моделями для описания распределений вероятностей интервалов занятости и вероятностей $P_N^k(j)$. Так, в работах Т.Л. Саати [30, 31] приведены формулы для распределения длительности периодов занятости, в частности для систем массового обслуживания (СМО) $M/D/1/\infty$, имеющие прикладное значение и могут использоваться проектировщиками при обосновании технических решений без помощи преобразующих функций. В работе [32] приведены формулы для распределения времени ожидания внутри интервалов занятости, которые могут использоваться для СМО $M/D/1/\infty$.

Значения параметров $N_{dost.}$ и t_{VIO} определяются в зависимости от структуры размещения вычислительных ресурсов в модуле принятия решений и в организационных системах транспозиционной структуры.

Заключение

На основании предшествующих настоящему исследованию работ по созданию методов и моделей в области повышения устойчивости беспилотных систем поставлена и решена научная задача о разработке архитектурной модели для модуля принятия решений по интеллектуальной поддержке проектов наукоёмких производств – проектов перспективного приборостроения в области создания роботизированных систем. Назначением данного модуля является обеспечение своевременности доставки информации о новых знаниях предприятий электронной промышленности непосредственно после получения результатов исследований.

Поставленная задача решается с учётом ключевых направлений развития электронной промышленности при проведении мероприятий по созданию технологического задела в виде программно-аппаратных комплексов, по обеспечению доступности современных средств проектирования и производства, по повышению информированности о существующих кооперационных производственных и инженерных возможностях, по формированию и развитию отраслевых баз данных, по обеспечению развития и унификации средств информационного обмена и по обеспечению участия отрасли электронной промышленности в реализации национальных и федеральных проектов и программ.

Выявлены предпосылки к созданию модуля принятия решений об интеллектуальной поддержке проектов, проведен анализ его аналогов и прототипа – цифровой платформы поддержки процессов организационных систем, определены их общие свойства и сформулировано отличительное свойство, которым должен обладать объект решения поставленной задачи – модуль принятия решений об интеллектуальной поддержке проектов.

На основании изложенного выше создана архитектурная модель данного модуля и разработан методический подход к контролю над нагрузкой трактов информационных систем в транспозиционной структуре, в составе которой функционирует модуль принятия решений. Новизна данной модели определяется наличием функционала по распознаванию адреса организационной системы, являющейся потенциальным потребителем результатов исследования, и передачи данных об исследовании в соответствии с адресом для производства высокотехнологичной продукции.

Благодаря использованию модуля принятия решений по интеллектуальной поддержке проектов наукоёмких производств может быть повышена результативность научной отрасли за счет увеличения числа исследований, в том числе, моделей и образцов новых высокотехнологичных продуктов, промышленно реализуемых в организационных системах транспозиционных структур различного назначения.

Литература

1. Kozlov S.V., Kubankov A.N., Shabanov A.P. Innovations in control systems of actions of robotic objects in the field of emergency response. Wave electronics and its application in information and telecommunication systems (WECNF 2019). 2019. P. 18994090. DOI:10.1109/WECNF.2019.8840139.



2. *Kozlov S.V., Kubankov A.N., Shabanov A.P.* On the role of the semantic knowledge model in ensuring the stability of reproduction of data transmission processes. *Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF 2020)*. 2020. P. 9131521. DOI:10.1109/WECONF48837.2020.913152.
3. *Kozlov S., Kubankov A., Shabanov A.* On the Transformation of Research Data Transmission Processes in the Digital Platform. *Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF 2021)*, (2021). DOI:10.1109/WECONF51603.2021.9470757.
4. *Андреева Т.А., Астанина Л.А.* Анализ промышленной структуры включенных в реестр Минпромторга России кластеров // *Тренды и управление*. 2018. № 4. С. 111–127. DOI:10.7256/2454-0730.2018.4.28159. EDN YUKAVV.
5. *Резанов В.К., Резанов К.В., Зверева Е.В., Юйлян Т.* Трансграничные зонтичные структуры как основа приграничного международного кластера // *Власть и управление на Востоке России*. 2018. № 4 (85). С. 90-99. DOI:10.22394/1818-4049-2018-85-4-90-99. EDN YWGSFN.
6. *Ташенова Л.В., Бабкин А.В.* Типология и структура промышленных кластеров // *Менеджмент в России и за рубежом*. 2019. № 1. С. 4-14. EDN OTLQQZ.
7. *Балаш О.С., Манукян М.М., Юкласова А.В.* Развитие инновационной активности интегрированных промышленных структур (на основе аэрокосмического кластера Самарской области) // *Вестник Самарского университета. Экономика и управление*. 2018. № 3 (9). С. 7-11. EDN TUFXFD.
8. *Мрочковский Н.С.* Развитие моделей управления организациями на основе их интеграции в структуру цифровых кластеров // *Вестник Российского экономического университета имени Г.В. Плеханова*. 2020. № 1 (1). С.159-163. <https://doi.org/10.21686/2413-2829-2020-1-159-163>.
9. *Субоч Ф.* Перспективы развития и особенности ассоциативной концепции при построении новейших транспозиционных структур, включая кластеры // *Аграрная экономика*. 2020. № 3 (298). С. 20-40. EDN YENECQ.
10. *Матюкин С.В.* Модели трансформации холдинговых структур в кластеры: сценарии в условиях российской экономики // *Власть*. 2020. № 5 (28). С. 143-151. <https://doi.org/10.31171/vlast.v28i5.7590>.
11. *Серикова Н.В.* Кластеры как способ реализации сетевых коммуникаций предпринимательских и прочих структур в условиях цифровой трансформации // *Экономика и предпринимательство*. 2020. № 12 (125). С. 739-744. DOI:10.34925/EIP.2021.125.12.147. EDN WHVAPA.
12. *Новикова И.В., Санько Г.Г., Тимофеева Ю.А.* Кластер как сетевая структура и фактор экономического роста национальной экономики // *Труды БГТУ. Серия 5: Экономика и управление*. 2018. № 2 (214). С. 22-27. EDN SLVIKL.
13. *Кудряшов В.С.* Структура формирования и функционирования территориального кластера на региональном уровне // *Ученые записки Тамбовского отделения РoCMY*. 2018. № 9. С. 56-68. EDN YRURKT.
14. *Халилов Н.Р.* Структура единой информационной платформы взаимодействия в автомобилестроительном кластере // *Проблемы современной экономики*. 2018. № 2 (66). С. 207-210. EDN VAIOYU.
15. *Безпалов В.В., Скрипник О.Б., Лочан С.А., Петросян Д.С.* 8.1. Региональные кластеры: понятие, структура и тенденции развития // *Аудит и финансовый анализ*. 2018. № 3. С. 153-161. EDN VPEFTT.
16. *Напольских Д.Л.* Анализ динамики изменения организационной структуры инновационных кластеров в Российской Федерации // *Инновационные технологии управления и права*. 2019. № 1 (24). С. 18-26. EDN VKYDUZ.
17. *Романова А.Т., Попова М.В.* Кластер как крупномасштабный проект по повышению конкурентоспособности производственно-экономических структур // *Вестник Московского гуманитарно-экономического института*. 2018. № 1. С. 80-86. EDN XMZVRR.
18. *Азяби Н.Г.* Влияние потенциала и процессов управления знаниями на эффективность малых и средних предприятий // *Бизнес-информатика*. 2018. № 3 (45). С. 39-52. DOI:10.17323/1998-0663.2018.3.39.52.
19. *Зеленков Ю.А.* Влияния управления знаниями и управления изменениями на эффективность организации // *Экономика и управление: проблемы, решения*. 2017. № 3 (4). С. 96-100. EDN YTQUBT.
20. *Андриченко А.* Принципы построения семантических MDM-систем // *САПР и графика*. 2011. № 5 (175). С. 69-73. EDN RYQEDP.
21. *Никешин А.В., Шнитман В.З.* Обзор расширяемого протокола аутентификации и его методов // *Труды ИСП РАН*. 2018. № 2 (30). С. 113-148. DOI:10.15514/ISPRAS-2018-30(2)-7.
22. *Аветисян А.А., Дробышевский М.Д., Турдаков Д.Ю.* Методы анализа информационных потоков в сети Интернет // *Труды Института системного программирования РАН*. 2018. № 6 (30). С. 199-220. DOI:10.15514/ISPRAS-2018-30(6)-11. EDN YURQAX.
23. *Позин Б.А., Галахов И.В.* Модели в нагрузочном тестировании // *Программирование*. 2011. Т. 37. № 1 (37). С. 20-35. DOI:10.1134/S036176881101004X. EDN OCARAB.
24. *Rafiq A., Mehmood A., Khan T.A.* [et al.]. Intent-based end-to-end network service orchestration system for multi-platforms // *Sustainability*. 2020. No 7 (12). P. 2782. DOI:10.3390/su12072782. EDN QEIYJB.
25. *Mansour D., Tschudin C., Osman H.* Load Balancing in the Presence of Services in Named-Data Networking // *Journal of Network and Systems Management*. 2020. No 2 (28). P. 298–339. DOI:10.1007/s10922-019-09507-x. EDN GENHBK.
26. Патент РФ 2630393. Интегрированная система управления / Зацаринный А.А., Шабанов А.П. Заявл. 31.03.2016. Опубл. 07.09.2017. Бюл. № 25. 18 с. EDN FJRDQS.
27. *Саати Т.Л.* Математические методы исследования операций // М.: Советское радио, 1963. 396 с.
28. *Саати Т.Л.* Элементы теории массового обслуживания и её приложения // М.: Советское радио, 1971. 520 с.
29. *Шабанов А.П.* Базовая модель состояния производительного ресурса информационной системы // *Труды 52-й научной конференции МФТИ «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук»*, (Москва – Долгопрудный, 01 января 2009 г.). Московский физико-технический институт (государственный университет), 2009. С. 47-49. EDN ZVOPSL.

DECISION-MAKING MODULE FOR INTELLECTUAL SUPPORT OF HIGH-TECH INDUSTRIES

SERGEY V. KOZLOV

Moscow, Russia, skozlov@ipiran.ru

ALEXANDER N. KUBANKOV

Moscow, Russia, a.n.kubankov@mtuci.ru

ALEXANDER P. SHABANOV

Moscow, Russia, apshabanov@mail.ru

KEYWORDS: data processing and transmission processes, info communication systems, robotic systems, projects, high-tech industries

ABSTRACT

Enterprises of high-tech industries of electronic, machine-building and other sectors of the economy, on the one hand, and research centers of academic, applied and educational institutions, on the other hand, make a counter search. The purpose of such a search is to identify research that is in demand by industry enterprises for conducting projects and manufacturing high-tech products, and to find the addresses of enterprises that are in demand by research institutions for marketing their scientific and innovative products. Practice shows that measures to search for targeted information are carried out for a limited time and, as a rule, at the first stages of the project. With this approach, the available information sometimes does not have time to reach its consumer on time. A similar situation is observed in the counter search – institutions, as a rule, are limited in the forces and means that are required when searching for potential consumers for the results of their research and when conducting contractual activities. For the efficiency of decision-making on the

management of knowledge-intensive production projects, in particular, robotic systems, due to the timely equipping of enterprises with the information they need about the results of research, the task of building a decision-making module for intellectual support of such projects is being solved. The goal of this module is to ensure the intensification of the processes of timely delivery of information about new knowledge in the field of high-tech industries to enterprises-manufacturers of microelectronic components, devices and to enterprises-developers of robotic systems. The basic basis of the decision-making module, which has a novelty, is its architectural model, built to implement the process of automatic recognition of the address of an enterprise that is a potential consumer of the results of a new study, and the process of transmitting data about these results in accordance with the address for use in projects for the development of new electronic components and for the production of robotic systems based on them.

REFERENCES

1. Kozlov S.V., Kubankov A.N., Shabanov A.P. (2019). Innovations in control systems of actions of robotic objects in the field of emergency response. *Wave electronics and its application in information and telecommunication systems (WECONF 2019)*. P. 18994090. DOI:10.1109/WECONF.2019.8840139.
2. Kozlov S.V., Kubankov A.N., Shabanov A.P. (2020). On the role of the semantic knowledge model in ensuring the stability of reproduction of data transmission processes. *Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF 2020)*. P. 9131521. DOI:10.1109/WECONF48837.2020.913152.
3. Kozlov S., Kubankov A., Shabanov A. (2021). On the Transformation of Research Data Transmission Processes in the Digital Platform. *Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF 2021)*. DOI:10.1109/WECONF51603.2021.9470757.
4. Andreeva T., Astanina L. (2018). Analysis of the industrial structure of clusters included into the register of the Ministry of Industry and Trade of Russia. *Trends and management*. No. 4. Pp. 111-127. DOI:10.7256/2454-0730.2018.4.28159. (In Rus)
5. Rezanov V.K., Rezanov K.V., Zvereva E.V., Yuylyan Tai. (2018). Cross-border umbrella structures as the basis of a cross-border international cluster. *Power and Administration in the East of Russia*. No. 4 (85). Pp. 90-99. DOI:10.22394/1818-4049-2018-85- 4-90-99. (In Rus)
6. Tashenova L.V., Babkin A.B. (2019). Typology and structure of industrial clusters. *Management in Russia and abroad*. No. 1. Pp. 4-14. EDN OTLQQZ. (In Rus)
7. Balash O.S., Manukyan M.M., Yuklasova A.V. (2018). Development of innovative activity of integrated industrial structures. *Vestnik of Samara University. Economics and Management*. No. 3 (9). Pp. 7-11. EDN TUFXFD. (In Rus)
8. Mrochkovsky N.S. (2020). Developing models of organization management on the basis of their integration in digital clusters. *Vestnik of the Plekhanov Russian University of Economics*. No. 1 (1). Pp. 159-163. DOI: <https://doi.org/10.21686/2413-2829-2020-1-159-163>. (In Rus)
9. Suboch F. (2020). Prospects for development and features of the associative concept in the construction of the latest transpositional structures, including clusters. *Agricultural economy*. No. 3 (298). Pp. 20-40. EDN YENECQ. (In Rus)
10. Matyukin S.V. (2020). Models of Transformation of the Holding Companies Structures into Clusters: Scenarios under the Context of

- the Russian Economy. *Vlast* [Authority]. No. 5 (28). Pp. 143-151. DOI: <https://doi.org/10.31171/vlast.v28i5.7590>. (In Rus)
11. Serikova N.V. (2020). Clusters as a way to implement network communications of business and other structures in the context of digital transformation. *Economics and entrepreneurship*. No. 12 (125). Pp. 739-744. DOI 10.34925/EIP.2021.125.12.147. EDN WHVAPA. (In Rus)
 12. Novikova I.V., Sanko G.G., Timofeeva Yu.A. (2018). Cluster as a network structure and factor of economic growth of national economy. *Trudi BGTU. Ceria 5: Ekonomika i upravleniya* [Economics and Management]. No. 2 (214). Pp. 22-27. EDN SLVIKL. (In Rus)
 13. Kudryashov V.S. (2018). The structure of the formation and functioning of territorial cluster at the regional level. *Uchenii zapiski Tambovskogo otdelenia RoSMU* [Scientific notes of the Tambov branch of the Russian Union of Young Scientists]. No. 9. Pp. 56- 68. EDN YRURKT. (In Rus)
 14. Khalilov N.R. (2018). The structure of the unified information platform of interaction in machine-building cluster. *Problemi sovremennoj ekonomiki* [Problems of the modern economy]. No. 2 (66). Pp. 207-210. EDN VAIYOU. (In Rus)
 15. Bezpalov V.V., Skripnik O.B., Lochan S.A., Petrosyan D.S. (2018). Regional clusters: concept, structure and tendencies of development. *Audit i finansovij analiz* [Audit and financial analysis]. No. 3. Pp. 153-161. EDN VPEFTT. (In Rus)
 16. Napolskich D.L. (2019). Analysis of the dynamics of changes in the organizational structure of innovation clusters in the *Russian Federation. Napolskich. Innovatsii technologii upravleniya i prava* [Innovative management and law technologies]. No. 1 (24). Pp. 18-26. EDN VKYDUZ. (In Rus)
 17. Romanova A.T., Popova M.V. (2018). Cluster as a large-scale project to increase the competitiveness of production and economic structures. *Vestnik Moskovskogo gumanitarnogo-ekonomicheskogo instituta*. No. 1. Pp. 80-86. EDN XMZVRR. (In Rus)
 18. Azyabi N.G. (2018). The impact of knowledge management capabilities and processes on SME performance. *Business Informatics*. No. 3 (45). Pp. 39-52. DOI: 10.17323/1998-0663.2018.3.39.52.
 19. Zelenkov Yu.A. (2017). The impact of knowledge management and change management on the effectiveness of the organization. *Economics and management: problems, solutions*. No. 3 (40). Pp. 96-100. (In Rus)
 20. Andrichenko A. (2011). Principles of construction of semantic MDM systems. *SAPR I grafika* [CAD and graphics]. No. 5 (175). Pp. 69-73. (In Rus)
 21. Nikeshin A.V., Shnitman V.Z. (2018). The review of Extensible Authentication Protocol and its methods. *Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS (Proceedings of ISP RAS)*. No. 30 (2). Pp. 113-148. DOI:10.15514/ISPRAS-2018-30(2)-7. (In Rus)
 22. Avetisyan A.A., Drobyshevskiy M.D., Turdakov D.Yu. (2018). Methods for Information Spread Analysis. *Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS (Proceedings of ISP RAS)*. No. 30 (6). Pp. 199-220. DOI:10.15514/ISPRAS-2018-30(6)-11. (In Rus)
 23. Pozin B.A., Galakhov I.V. (2011). Models in performance testing. *Programming and Computer Software*. No. 1 (37). Pp. 15-25. DOI:10.1134/S036176881101004X. EDN OCARAB.
 24. Rafiq A., Mehmood A., Khan T.A. et al. (2020). Intent-based end-to-end network service orchestration system for multi-platforms *Sustainability*. No. 7 (12). P. 2782. DOI 10.3390/su12072782.
 25. Mansour D., Tschudin C., Osman H. (2020). Load Balancing in the Presence of Services in Named-Data Networking. *Journal of Network and Systems Management*. No. 2 (28). Pp. 298-339. DOI:10.1007/s10922-019-09507-x.
 26. Patent RF 2630393. Integrated control system. Zatsarinnyy A.A., Shabanov A.P. Declared 31.03.2016. Published 07.09.2017. Bulletin No. 25. 18 p. (In Rus)
 27. Saati T.L. (1963). *Matematicheskie metodi issledovaniya operatsiy* [Mathematical methods of operations research]. Moscow: Sovetskoe radio. 396 p.
 28. Saati T.L. (1971). *Elementi teorii massovogo obslugivaniya i ee prilozheniya* [Elements of queuing theory and its applications]. Moscow: Sovetskoe radio. 520 p.
 29. Shabanov A.P. (2009). The basic model about the states of a productive resource within an information system. Modern problems of fundamental and applied Sciences: proceedings of the 52nd MIPT Scientific Conference. Moscow-Dolgoprudny: Moscow Institute of Physics and Technology (State University). Pp. 47-49. (In Rus)

INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Kozlov S.V., 1PhD, Head of the Division, Federal Research Center "Computer Science and Control" Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, skozlov@ipiran.ru

Kubankov A. N., PhD, Full Professor, Head of Department, Moscow Technical University of Communication and Informatics, Moscow, Russia, a.n.kubankov@mtuci.ru

Shabanov A. P., PhD, leading researcher, Federal Research Center "Computer Science and Control" Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, apshabanov@mail.ru

For citation: Kozlov S.V., Kubankov A.N., Shabanov A.P. Decision-making module for intellectual support of high-tech industries. H&ES Reserch. 2022. Vol. 14. No. 2. P. 36-43. doi: 10.36724/2409-5419-2022-14-2-36-43 (In Rus)

doi: 10.36724/2409-5419-2022-14-2-44-51

КОМПЛЕКСНАЯ МЕТОДИКА ОБНАРУЖЕНИЯ КИБЕРАТАК НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАЦИИ ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛИЗА И СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

ПЕРОВ
Роман Александрович¹

ЛАУТА
Олег Сергеевич²

КРИБЕЛЬ
Александр Михайлович³

ФЕДУЛОВ
Юрий Владимирович⁴

АННОТАЦИЯ

Введение: Применение в современных компьютерных сетях информационных и коммуникационных технологий сбора информации дает возможность злоумышленнику воздействовать на сетевую инфраструктуру путем реализации кибератак [1]. Кибератаки могут достигать цели за счет массового использования устаревших операционных систем, малоэффективных механизмов защиты и наличия множественных уязвимостей в незащищенных сетевых протоколах. Подобные уязвимости дают потенциальному злоумышленнику возможность изменять настройки сетевых устройств, прослушивать и перенаправлять трафик, блокировать сетевое взаимодействие и получать несанкционированный доступ к внутренним компонентам компьютерных сетей. **Цель работы** заключается в разработке методики выявления аномалий в сетевом трафике за счет определения степени самоподобия трафика с использованием фрактального анализа и статистических методов. **Используемые методы:** программная реализация предложенной методики и формирования набора данных, содержащего сетевые пакеты. Результаты экспериментов продемонстрировали наличие самоподобия сетевого трафика и подтвердили высокую эффективность предложенной методики, которая позволяет обнаруживать кибератаки в реальном или близком к реальному времени. **Научная новизна** заключается в том, что предложенная методика предусматривает три этапа, в рамках которых выполняются анализ свойства самоподобия для эталонного трафика (с применением теста Дики-Фуллера, R/S анализа и метода DFA), анализ свойства самоподобия для реального трафика (теми же методами) и дополнительной обработки временных рядов статистическими методами (методы скользящего среднего (MA), Z-Score и CUSUM). **Результат:** представленная методика позволяет выявлять в реальном и близко к реальному масштабу времени воздействие кибератак, а использование статистических методов повышает точность определения кибератак. **Практическая значимость:** представленная методика является универсальной и может быть применена в системах информационного обмена органов государственного управления выполняя задачи обеспечения безопасности страны.

Сведения об авторах:

¹адъюнкт 32 кафедры Военной академии связи имени маршала Советского союза С.М. Буденного, Санкт-Петербург, Россия, roma.perov@list.ru

²профессор кафедры Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова (ГУМРФ), д.т.н., Санкт-Петербург, Россия, laos-82@yandex.ru

³соискатель 32 кафедры Военной академии связи имени маршала Советского союза С.М. Буденного, Санкт-Петербург, Россия, nemo4ka74@gmail.com

⁴соискатель АО "НИИ "Рубин", Санкт-Петербург, Россия, ksi-2016@yandex.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: фрактальный анализ, кибератаки, статистические методы, самоподобие, сетевой трафик.

Для цитирования: Перов Р.А., Лаута О.С., Крибель А.М., Федулов Ю.В. Комплексная методика обнаружения кибератак на основе интеграции фрактального анализа и статистических методов // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2022. Т. 14. № 2. С. 44-51. doi: 10.36724/2409-5419-2022-14-2-44-51

Общее описание предлагаемого метода

К основным методам, позволяющим выполнить все этапы обнаружения кибератак, относятся расширенный тест Дики-Фуллера, R/S анализ и метод DFA [2].

Предлагаемый метод детектирования кибератак предусматривает три этапа:

- вспомогательный (анализ самоподобия в эталонном трафике);
- основной (анализ самоподобия в реальном трафике);
- заключительный (классификация атак с помощью дополнительного статистического анализа).

На первом этапе, вспомогательном, анализируются самоподобные свойства эталонного сетевого трафика. В эталонном трафике отсутствуют аномалии. В результате этого анализа определяется значение показателя Херста, соответствующее эталонному трафику. Этот этап можно назвать этапом обучения. Для определения значений показателя Херста используются рассмотренные выше методы тестирования Дики-Фуллера, R/S анализа и DFA.

На втором этапе, основном, анализируются самоподобные свойства реального трафика, для которого могут быть характерны аномалии, вызванные воздействием кибератак. При этом также используются рассмотренные выше методы определения значений показателя Херста. Если выявленное значение показателя Херста отличается от значения, полученного для эталонного трафика, принимается решение о наличии аномалий в реальном трафике, которые могут быть вызваны воздействием кибератак. Кроме того, на этом же этапе определяется минимальный размер группы пакетов, достаточный для точной оценки показателя самоподобия. Чем скромнее размер этой группы, тем меньше время требуется для детектирования кибератаки.

На третьем этапе на основе методов математической статистики осуществляется классификация кибератак в целях реализации мер защиты.

Реализация метода

В качестве исследуемого сценария был выбран трафик, соответствующий существующей компьютерной сети, состоящей из узловых элементов (четырёх маршрутизаторов и восьми персональных компьютеров), а также сетевых элементов, включающих семь маршрутизаторов. В этом сценарии процесс передачи пакетов сообщений является стационарным. В качестве реализуемых атак учитывались кибератаки типов DDoS и "Сканирование сети и ее уязвимостей".

Учитывая вышеизложенное, в качестве основных исследуемых характеристик в наборе данных рассматривались структура трафика, длина заголовка пакета, флаги, контрольная сумма и некоторые другие.

С целью проведения эксперимента были сформированы два датасета. Первый датасет включал эталонный трафик и использовался для обучения системы и анализа трафика без аномалий. Второй датасет, включающий кибератаки типов DDoS и "Сканирование сети и ее уязвимостей", применялся для проверки эффективности рассматриваемого метода и

обнаружения его преимуществ перед другими методами.

Для демонстрации возможности выявления самоподобия трафика компьютерной сети было смоделировано и исследовано несколько выборок, содержащих 1024 точки, распределенные по закону фрактального броуновского движения с различными значениями показателя Херста: 0,3, 0,5 и 0,8.

Программная реализация предложенного метода обнаружения кибератак была выполнена на языке Python с использованием следующих библиотек и инструментов: Pandas, NumPy, Matplotlib и Jupiter Notebook.

Библиотека Pandas обеспечивает работу с высокоуровневыми сводными таблицами, их группировку и другие манипуляции с ними, а также легкий доступ к табличным данным. Библиотека NumPy – инструмент низкого уровня для работы с математическими функциями высокого уровня, а также с многомерными массивами. Модуль Matplotlib предоставляет возможности формирования графиков на основе полученного набора данных. Jupiter Notebook служил командной оболочкой для интерактивных вычислений [3].

Экспериментальная проверка метода

При экспериментальной проверке метода на первых двух этапах для нахождения показателя Херста (H) использовались R/S анализ и метод DFA. Многие исследователи применяют R/S анализ для нахождения показателя H в сетевом трафике. Однако R/S анализ дает большую погрешность, достигающую 20–30% в случае нестационарных процессов. Это свидетельствует о нежелательности применения R/S анализа в такой ситуации [4]. Поэтому для нахождения показателя скейлинга в нестационарном трафике предлагается использовать метод DFA, а для нахождения H в стационарных процессах – как DFA, так и R/S анализ.

Следует заметить, что при изменении H преследовалась цель получения как можно более разнообразного случайного сигнала, не похожего на предыдущий, с целью максимальной проверки работоспособности алгоритмов, необходимых для выявления различных кибератак. Поэтому границы интервалов по оси времени не фиксировались. Изменение H в ходе имитации осуществлялось программным способом. Для этого использовалось средство Matplotlib. Затем выполнялся анализ самоподобия смоделированного сигнала с помощью рассмотренных выше алгоритмов оценки H . Найденное значение параметра H сравнивалось с эталонным. Только после проверки работоспособности алгоритмов осуществлялся переход к работе с реальным трафиком [5].

При исследовании нестационарного временного ряда в нем обычно отмечают три компоненты:

- тренд T_t , который описывает плавное изменение уровней ряда, вызванное долгосрочными факторами;
- сезонная компонента S_t , которая определяет периодические колебания уровней ряда;
- случайная компонента E_t , которая описывает влияние случайных, неучтенных факторов или ошибок измерения.

Каждый уровень ряда X_t таким образом можно

представить в виде функции $F = (T_t, S_t, E_t)$. Вид этой функции определяет взаимосвязь компонент уровня ряда и указывает на следующую модель ряда:

- аддитивная: $X_t = T_t + S_t + E_t$;
- мультипликативная: $X_t = T_t * S_t * E_t$;
- смешанная: $X_t = T_t * S_t + E_t$.

При выраженных компонентах T_t и S_t , а также незначительном шуме можно визуально идентифицировать модель ряда. Поэтому будем полагать, что сетевому трафику

соответствует смешанная модель, в которой учитываются все три ее компоненты.

Первоочередная задача перед обработкой временного ряда – определение его стационарности. Для того, чтобы определить стационарен ряд или нет, применялся тест Дики-Фуллера [6]. Результат тестирования временного ряда, отображающего интенсивность сетевого трафика, представлен на рисунке 1. На рисунке 1а отображена функция автокорреляции, а на рисунке 1б – функция частичной автокорреляции.

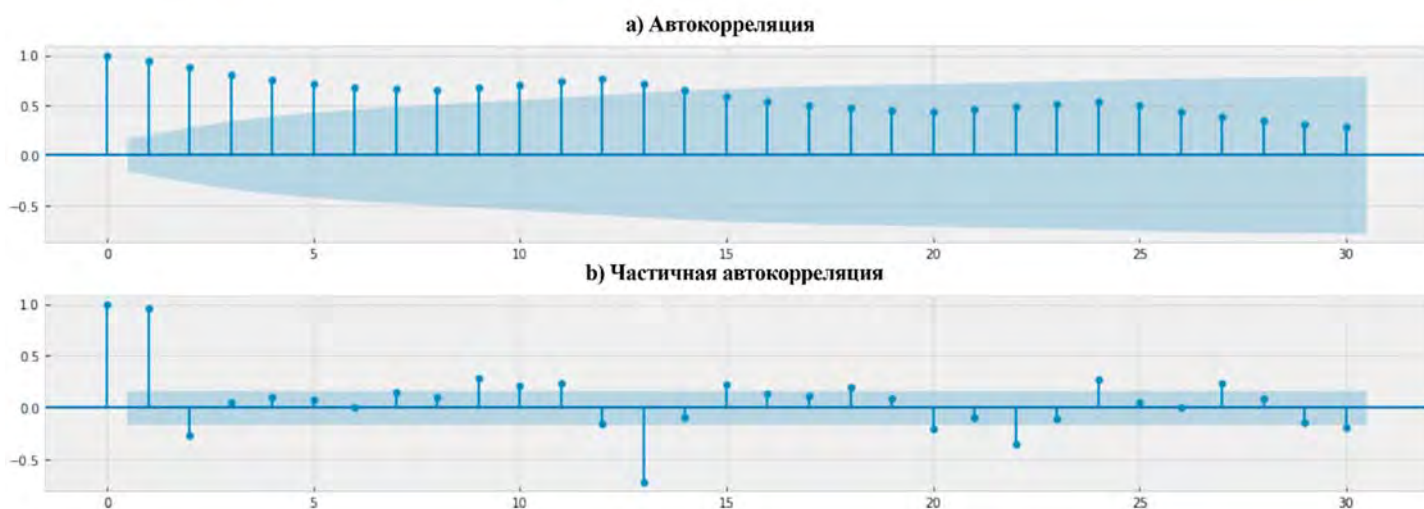


Рис. 1. Результат применения теста Дики-Фуллера

Поясним смысл этих функций. Одно из главных отличий последовательности наблюдений, образующих временной ряд, от случайной выборки заключается в том, что члены временного ряда являются статистически взаимосвязанными. Степень тесноты статистической связи между двумя случайными величинами может быть измерена парным коэффициентом корреляции.

На рисунке 1 коэффициент корреляции измеряет корреляцию, существующую между членами одного и того же временного ряда. Поэтому его принято называть коэффициентом автокорреляции, а при анализе изменения коэффициента автокорреляции в зависимости от значения интервала между членами ряда говорят об автокорреляционной функции. Ее график называют коррелограммой. Автокорреляционная функция безразмерна. Ее значения изменяются в диапазоне от -1 до $+1$.

Близость значений автокорреляционной функции к нулю свидетельствует о слабой зависимости между уровнями ряда или ее отсутствии, близость к единице – о сильной зависимости. По значениям автокорреляционной функции можно судить о тренде или сезонной компоненте. Так, если наибольшее значение среди значимых коэффициентов корреляции набирает первый коэффициент (как на рис.1а), то можно

говорить о наличии тренда, который является доминирующим в этом временном ряду.

Если наибольшее значение набирает коэффициент порядка k , то ряд имеет повторяющиеся колебания с периодом k наблюдений. Если среди коэффициентов корреляционной функции нет значимых, то это свидетельствует об отсутствии тренда и сезонной компоненты.

Для нахождения чистого влияния периодических явлений можно также использовать частичную автокорреляцию. Как видно из рис. 1б, местами она очень высокая. Поэтому не исключается влияние промежуточных уровней временного ряда. Таким образом, тест Дики-Фуллера и графики коррелограмм не отвергают гипотезу о нестационарности ряда. Ряд является нестационарным.

Теперь рассмотрим результаты применения метода скользящего среднего (МА). На рисунке 2 представлены результаты вычисления скользящего среднего для различных временных рядов, полученных из сетевого трафика: интенсивность трафика (рис. 2а), количество байт в сети (рис. 2б), UDP поток (рис. 2с) и нефильтрованный сетевой трафик (рис. 2д). Синие линии показывают исходный трафик, а красные – скользящее среднее.

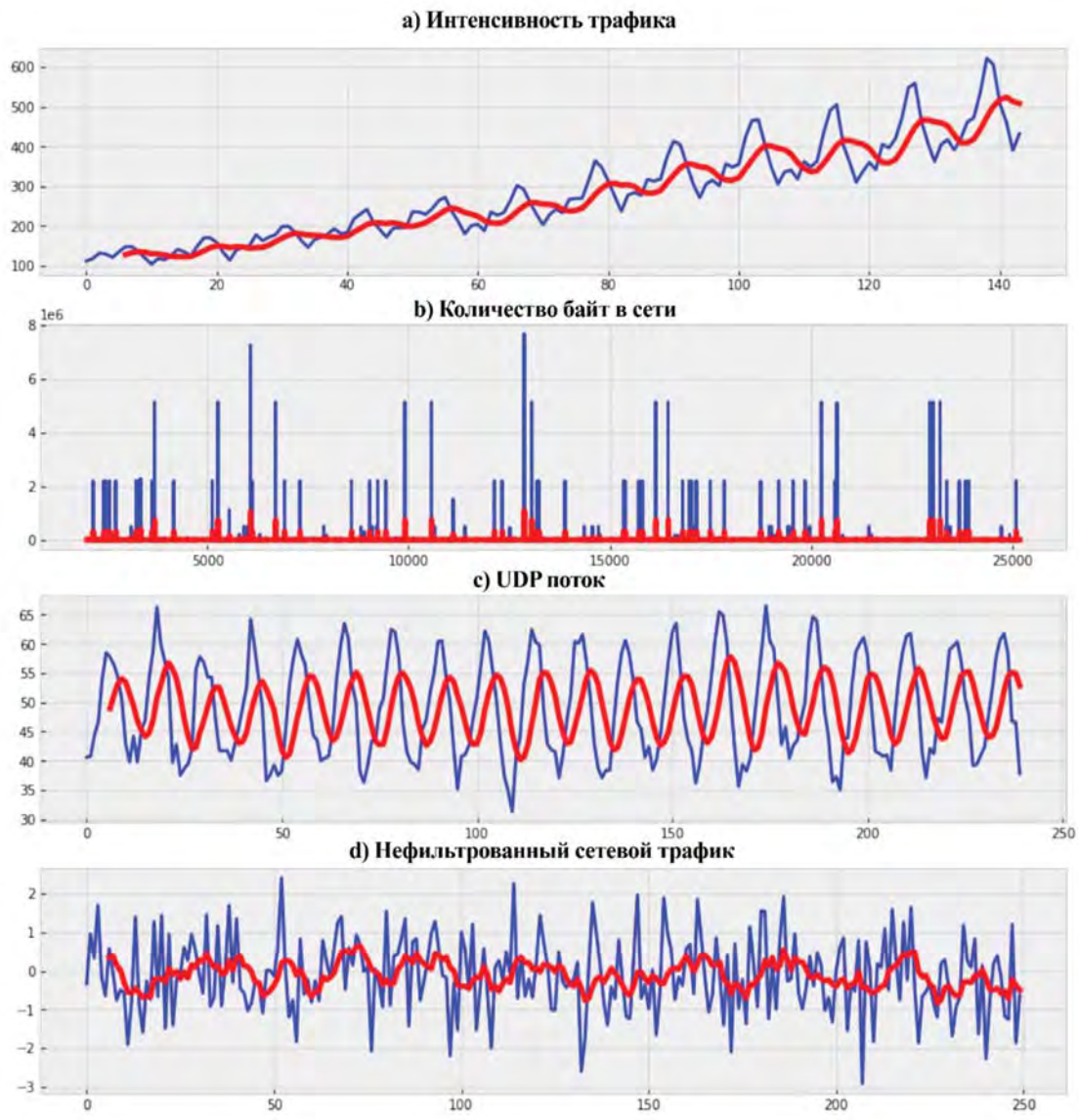


Рис. 2. Результат применения метода скользящего среднего

Для метода МА характерны два недостатка, которые были обнаружены в ходе экспериментальной проверки предлагаемого метода. Первый заключается в том, что с помощью этого метода можно прогнозировать поведение трафика только на ближайшие периоды времени. Прогноз актуален всего лишь в течение 15-20 минут. Второй недостаток обусловлен тем, что метод МА отличается повышенной чувствительностью к выбросам данных. Кратковременный, но очень сильный всплеск приводит к достаточно длительному и существенному изменению амплитуды скользящего среднего. Для устранения этого недостатка можно использовать модификацию метода МА, в которой каждое предыдущее значение имеет разный вес.

Данный метод можно назвать взвешенной скользящей средней (WMA). С его помощью можно указать, насколько важно конкретное историческое значение для нового прогноза.

Метод WMA позволяет учитывать временной контекст. Чем раньше произошло событие, тем меньше его влияние на прогнозируемое событие. Сдвиг в методе WMA меньше, чем в методе МА. Метод WMA более чувствителен к колебаниям.

Рассмотрим результаты применения других дополнительных методов, которые были упомянуты выше.

Результат обработки исходного сигнала методом потока окна

(Z-Score) представлен на рисунке 3.

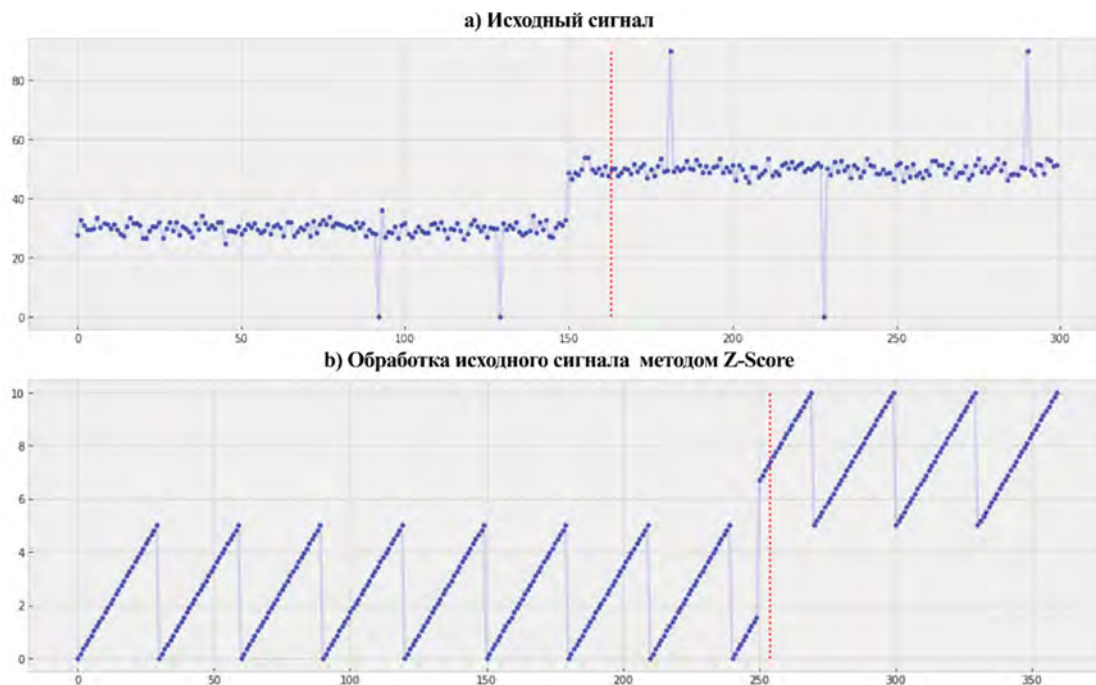


Рис. 3. Обработка сигнала методом Z-Score

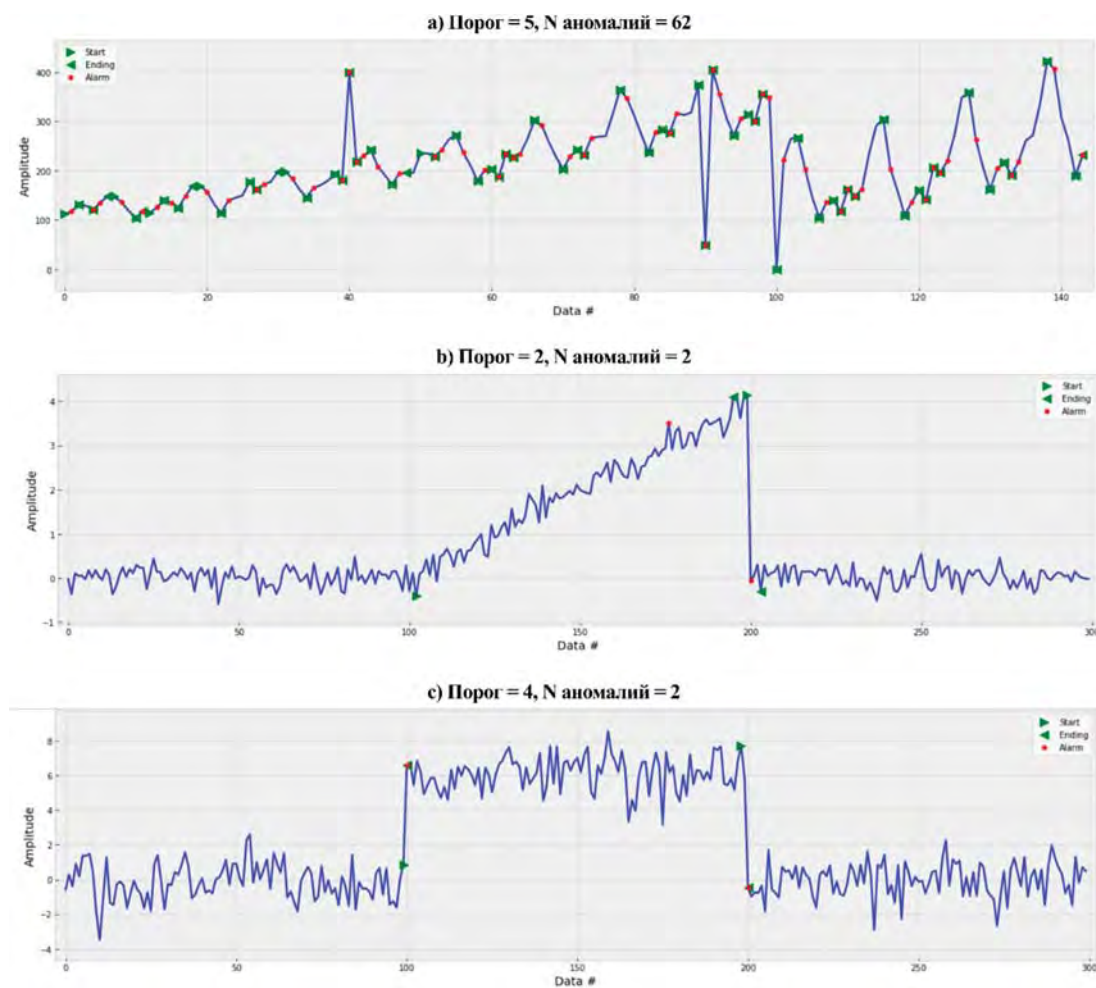


Рис. 4. Обработка сигнала методом CUSUM

На рисунке 3а представлен исходный сигнал, для которого характерна аномалия в районе 150 минут. На рисунке 3б показан результат обработки исходного сигнала методом Z-Score. Видно, что данный метод помогает выделить периодичность сигнала, а также обнаружить аномалию (отражена красным цветом). Однако выявляется аномалия с запаздыванием в 100 минут. Продолжительность запаздывания равняется величине установленного временного окна.

Результаты обработки сигнала методом кумулятивных сумм CUSUM показаны на рисунке 4. Экспериментальные данные приведены для различных значений порога и количества аномалий. На рисунках 4б и 4с представлены результаты, в которых содержатся две аномалии. Однако пороговые значения для этих случаев различны. На рисунке 4б порог равен двум, а на рисунке 4с – четырем. На этих же рисунках представлены результаты обнаружения аномалий. Начало и конец выявленных аномалий помечены зелеными стрелками. Красная точка показывает наиболее вероятный элемент временного ряда, который содержит аномалию.

На рисунке 4а представлен наиболее "трудный" случай, который рассматривался в ходе экспериментальной проверки метода. Видно, что временной ряд содержит 62 аномалии. Все эти аномалии были успешно выявлены. Как и для двух предыдущих случаев, для каждой аномалии были установлены начало и конец, а также наиболее вероятный элемент, содержащий эту аномалию.

Таким образом, экспериментальные результаты показали, что дополнительное применение методов MA, WMA, Z-Score и CUSUM на третьем этапе позволяет успешно обнаруживать как однократные, так и множественные аномалии в сетевом трафике. Следовательно, предложенный метод может применяться для выявления аномалий, вызванных реализацией различных компьютерных атак, включая атаки вида DDoS и скакирования.

Заключение

Для проектирования систем потоковой аналитики и потоковой обработки данных характерны свои нюансы, проблемы и свой технологический стек. Анализ результатов сравнительной оценки показывает, что среди главных преимуществ фрактального анализа – скорость его работы, а также возможность обнаружения аномалий при любом виде трафика. К увеличению времени расчета приводит только рост количества обрабатываемых параметров заголовка протокола передачи данных (длина пакета, флаги и т. д.).

При тестировании фрактальных методов, позволяющих исследовать долговременные зависимости в трафике компьютерной сети, метод DFA является более эффективным, чем R/S анализ, из-за его возможности обрабатывать не только стационарные, но и нестационарные ряды с высокой точностью. Для компьютерных сетей преимущества DFA, по сравнению с более старым методом R/S, заключаются в том, что

он устраняет локальные тренды посредством регрессионного соответствия методом наименьших квадратов и относительно невосприимчив к нестационарности. Следовательно, DFA позволяет обнаруживать корреляции на большие расстояния, встроенные в нестационарные ряды. Это характерно для компьютерных сетей и можно избежать ложного обнаружения явных корреляций на большие расстояния, которые являются артефактами нестационарности.

Кроме того, проведена экспериментальная оценка ряда статистических методов, которые включены в третий этап предлагаемого метода раннего обнаружения атак. Данные методы предназначены для проверки отклонения исходного сигнала от некоторого опорного значения (чаще всего от среднего арифметического). К таким методам относятся методы скользящего среднего, потоковых окон и кумулятивных сумм.

Основываясь на результатах экспериментальной проверки, можно сделать вывод, что предложенный метод является достаточно корректным. Дальнейшие исследования предполагают интеграцию предлагаемого метода раннего выявления атак с другими известными и имеющимися в арсенале компьютерной безопасности методами детектирования атак.

Литература

1. Котенко Д.И., Котенко И.В., Саенко И.Б. Методы и средства моделирования атак в больших компьютерных сетях: состояние проблемы // Труды СПИИРАН. 2012. № 3(22). С. 5-30.
2. Крупенин С.В. Фрактальные излучающие структуры и аналоговая модель фрактального импеданса. Дис. канд. физ.-мат. наук: 01.04.03, 01.04.04 / [Место защиты: Моск. гос. ун-т им. М.В. Ломоносова. Физ. фак.]. Москва. 2009. 157 с.
3. Карнов М.А., Митрофанов М.В., Лаута О.С., Пальцин Д.А. Методика управления защитой информационно-телекоммуникационной сети // Электросвязь. 2021. № 12. С. 49-57.
4. Котенко И.В., Крибель А.М., Лаута О.С., Саенко И.Б. Анализ процесса самоподобия сетевого трафика как подход к обнаружению кибератак на компьютерные сети // Электросвязь. 2020. № 12. С. 54-59.
5. Карнов М.А., Коцыняк М.А., Нечепуренко А.П. Модель функционирования информационно-телекоммуникационной сети специального назначения в условиях информационного воздействия // Актуальные проблемы защиты и безопасности : Труды XXIV Всероссийской научно-практической конференции РАРАН. В 7-ми томах, Санкт-Петербург, 31 марта – 03 2021 года. Москва: Российская академия ракетных и артиллерийских наук, 2021. С. 458-462.
6. Лепешкин О.М., Карнов М.А., Остроумов О.А., Синюк А.Д. Методологический подход управления обеспечением функциональной безопасности и функциональной устойчивости системы связи критически важных объектов и объектов критической информационной инфраструктуры // FISP-2021: Фундаментальные проблемы информационной безопасности в условиях цифровой трансформации : Сборник докладов III Всероссийской научной конференции (с приглашением зарубежных ученых), Ставрополь, 30 ноября 2021 года. Ставрополь: Северо-Кавказский федеральный университет, 2021. С. 105-110.

A COMPREHENSIVE TECHNIQUE FOR DETECTING CYBER AT-TACKS BASED ON THE INTEGRATION OF FRACTAL ANALYSIS AND STATISTICAL METHODS

ROMAN A. PEROV,
St. Petersburg, Russia, roma.perov@list.ru

OLEG S. LAUTA,
St. Petersburg, Russia, laos-82@yandex.ru

ALEXANDER M. KRIBEL,
St. Petersburg, Russia, nemo4ka74@gmail.com

YURI V. FEDULOV,
St. Petersburg, Russia, ksi-2016@yandex.ru

KEYWORDS: *fractal analysis, cyberattacks, statistical methods, self-similarity, network traffic*

ABSTRACT

The article discusses a method for detecting cyber attacks on computer networks based on detecting anomalies in network traffic by assessing its self-similarity and determining the impact of cyber attacks using statistical methods. The proposed methodology provides for three stages, within which the analysis of the self-similarity property for reference traffic is performed (using the Dickey-Fuller test, R/S analysis and the DFA method), the analysis of the self-similarity property for real traffic (by the same methods) and additional processing of time series by statistical methods (moving average, Z-Score and CUSUM). The issues of software implementation of the proposed approach and the formation of a data set containing network packets are considered. The results of the experiments demonstrated the presence of self-similarity of network traffic and confirmed the high efficiency of the proposed method, which allows detecting cyber attacks in real or near real time. **Introduction:** The use of information and communication technologies for information collection in modern computer networks makes it possible for an attacker to influence the network infrastructure by implementing cyber attacks [1]. Cyberattacks can achieve their goals due to the massive use of outdated operating systems, ineffective protection mechanisms and the presence of multiple vulnerabilities in unsecured network protocols. Such vulnerabilities give a potential attacker the ability to change the settings of network devices, listen and redirect traffic, block

network interaction and gain unauthorized access to internal components of computer networks. The purpose of the work is to develop a methodology for detecting anomalies in network traffic by determining the degree of self-similarity of traffic using fractal analysis and statistical methods. **Methods used:** software implementation of the proposed methodology and the formation of a data set containing network packets. The results of the experiments demonstrated the presence of self-similarity of network traffic and confirmed the high efficiency of the proposed technique, which allows detecting cyber attacks in real or near real time. The scientific novelty lies in the fact that the proposed methodology provides for three stages, within which the analysis of the self-similarity property for reference traffic is performed (using the Dickey-Fuller test, R/S analysis and the DFA method), the analysis of the self-similarity property for real traffic (by the same methods) and additional processing of time series by statistical methods (methods moving Average (MA), Z-Score and CUSUM). **Result:** the presented methodology allows detecting the impact of cyberattacks in real and close to real time, and the use of statistical methods increases the accuracy of determining cyberattacks. Practical significance: the presented methodology is universal and can be applied in the information exchange systems of public administration bodies performing the tasks of ensuring the security of the country.

REFERENCES

1. Kotenko D.I., Kotenko I.V., Saenko I.B. (2012). Methods and means of modeling attacks in large computer networks: the state of the problem. *Proceedings of SPIIRAN*. No. 3(22), pp. 5-30. (In Russian)
2. Krupenin S.V. (2009). Fractal radiating structures and analog fractal impedance model. Dis. Candidate of Physical and Mathematical Sciences: 01.04.03, 01.04.04. [Place of protection: Moscow State University named after M.V. Lomonosov. Phys. fac.]. Moscow. 157 p. (In Russian)
3. Karpov M. A., Mitrofanov M. V., Lauts O. S., Paltsin D. A. (2021). Methods of managing the protection of the information and telecommunications network. *Electrosvyaz*. No. 12, pp. 49-57. (In Russian)
4. Kotenko I. V., Kribel A.M., Lauts O.S., Saenko I.B. (2020). Analysis of the process of self-similarity of network traffic as a way to detect cyber attacks on computer networks. *Telecommunication*. No. 12. pp. 54-59. (In Russian)
5. Karpov M. A., Kotsynyak M. A., Nechepurenko A. P. (2021). The model of functioning of the information and telecommunications net-

work of special purpose in the conditions of information action. Actual problems of protection and security. *Proceedings of the XXIV All-Russian Scientific and Practical Conference RARAN. 7 vol.*, St. Petersburg, March 31-03, 2021. Moscow: Russian Academy of Rocket and Artillery Sciences, 2021, pp. 458-462. (In Russian)

6. Lepeshkin O.M., Karpov M.A., Ostroumov O.A., Sinyuk A.D. (2021). Methodological approach to managing functional security and

functional stability of the communication system of critical facilities and critical information infrastructure. *FISP-2021: Fundamental problems of information security in the conditions of digital transformation. Collection of reports of the III All-Russian Scientific conference (with the invitation of foreign scientists)*, Stavropol, November 30, 2021. Stavropol: North Caucasus Federal University, 2021, pp. 105-110. (In Russian)

INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Roman A. Perov, postgraduate of the 32 department of the Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny, St. Petersburg, Russia, roma.perov@list.ru

Oleg S. Lauta, professor of the Department of Admiral S.O. Makarov State University of Marine and River Fleet, Doctor of Technical Sciences, St. Petersburg, Russia, laos-82@yandex.ru

Alexander M. Kribel, candidate of the 32 department of the Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny, St. Petersburg, Russia, nemo4ka74@gmail.com

Yuri V. Fedulov, candidate of JSC "Research Institute "Rubin", St. Petersburg, Russia, ksi-2016@yandex.ru

For citation: Perov R.A., Lauta O.S., Kribel A.M., Fedulov Yu.V. Complex method for detecting cyber attacks based on integration of fractal analysis and statistical methods. *H&ES Reserch. 2022. Vol. 14. No. 2. P. 44-51. doi: 10.36724/2409-5419-2022-14-2-44-51* (In Rus)

А S I C А Н И К

ПРИ ПОДДЕРЖКЕ *Юлианна Торманова*

Международная Ассамблея
«Каспийский Диалог -
2022»

МОСКВА - 11 МАЯ - 2022 -

КУЛЬТУРНЫЙ ЦЕНТР ГЛАВУПДК
ПРИ МИД РОССИИ

WWW.CASPIANSOINET.RU

WWW.CASPIANDIALOGUE.RU

ПРИМЕНЕНИЕ ПЕРСПЕКТИВНОГО МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО ЭШЕЛОНИРОВАННОГО ВОЗДУШНОГО КОМПЛЕКСА НА БАЗЕ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ЛЕГЧЕ ВОЗДУХА В ОРГАНАХ ВНУТРЕННИХ ДЕЛ

ГРАЧЁВ

Юрий Александрович¹

СОКОЛОВ

Виктор Михайлович²

МЕЛЬНИКОВ

Николай Михайлович³

ЛОКТИОНОВ

Олег Викторович⁴

Сведения об авторах:

¹к.т.н., доцент, начальник кафедры "Специальных мероприятий и специальной техники" Санкт-Петербургского Университета МВД, Санкт-Петербург, Россия, super.19692012@yandex.ru

²к.т.н., старший преподаватель кафедры "Специальных мероприятий и специальной техники" Санкт-Петербургского Университета МВД, Санкт-Петербург, Россия, compas-tfc@mail.ru

³к.т.н., старший преподаватель кафедры "Специальных мероприятий и специальной техники" Санкт-Петербургского Университета МВД, Санкт-Петербург, Россия, Spnsh1@mail.ru

⁴к.т.н., старший преподаватель кафедры "Специальных мероприятий и специальной техники" Санкт-Петербургского Университета МВД, Санкт-Петербург, Россия, 5733242@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение: В работе осуществлено обоснование использования воздухоплавательных аппаратов в интересах органов внутренних дел Российской Федерации. **Цель исследования:** анализ возможностей существующих беспилотных летательных аппаратов тяжелее воздуха и известных воздухоплавательных аппаратов, а также широкой гаммы полезных нагрузок для синтеза многоуровневой системы воздушного базирования органов внутренних дел. **Результаты:** в статье, на основе анализа существующих беспилотных летательных аппаратов и воздухоплавательных летательных аппаратов, сформулированы предложения по построению и применению в органах внутренних дел Российской Федерации перспективного многофункционального эшелонированного воздушного комплекса на базе летательных аппаратов легче воздуха. Исходя из специфики задач, стоящих перед подразделениями органов внутренних дел, предложены различные варианты построения воздушного комплекса, а также его оснащения разработанными и существующими модулями полезной нагрузки. **Практическая значимость:** разработаны практические рекомендации построения по двухэшелонной схеме воздушного комплекса на базе воздухоплавательных аппаратов для органов внутренних дел. Первый эшелон построен на известных образцах привязных аэростатных комплексов (стационарная компонента) и средневысотных беспилотных дирижаблей (мобильная компонента), а также предложенных в данной статье перспективных малых (до 50 килограмм нагрузки) и ультрамалых (до 20 килограмм нагрузки) привязных и беспилотных воздухоплавательных летательных аппаратов (стационарная и мобильная компоненты). Для построения второго эшелона перспективного многофункционального эшелонированного воздушного комплекса на базе летательных аппаратов легче воздуха предлагается использовать беспилотные высотные аэростатические платформы (мобильная компонента). **Обсуждение:** результаты, полученные в статье, предлагается использовать для расчёта тактико-технических характеристик отдельных модулей и всего комплекса в целом, для расчёта тактико-технических характеристик и устойчивости системы ретрансляторов, развёртываемой на базе воздухоплавательных аппаратов, а также при разработке алгоритма управления координацией множества взаимодействующих воздухоплавательных аппаратов и беспилотных летательных аппаратов тяжелее воздуха.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Министерство внутренних дел Российской Федерации, органы внутренних дел, воздухоплавательный летательный аппарат, ВПЛА, привязной аэростатный комплекс, средневысотный беспилотный дирижабль, высотный беспилотный аэростатический комплекс

Для цитирования: Грачёв Ю.А., Соколов В.М., Мельников Н.М., Локтионов О.В. Применение перспективного многофункционального эшелонированного воздушного комплекса на базе летательных аппаратов легче воздуха в органах внутренних дел // Научные исследования в космических исследованиях Земли. 2022. Т. 14. № 2. С. 52-65. doi: 10.36724/2409-5419-2022-14-2-52-65



Введение

В ходе проведения специальной военной операции (СВО) на Украине беспилотные летательные аппараты (БПЛА) неоднократно доказали свою эффективность и стали одной из важнейших подсистем поддержки принятия решения, обеспечивающих синергию различных современных средств поражения и их комплексное применение.

Тем не менее, применение современных беспилотных летательных аппаратов, построенных по вертолётной и самолётной схемам, ограничено несколькими параметрами, которые обусловлены конструктивными особенностями летательных аппаратов тяжелее воздуха. Среди важнейших тактико-технических характеристик беспилотных летательных аппаратов тяжелее воздуха можно выделить время нахождения в воздухе, грузоподъёмность, шум и уязвимость при использовании на низких высотах. Нивелировать недостатки беспилотных летательных аппаратов тяжелее воздуха, а также многократно усилить их достоинства, способны летательные аппараты легче воздуха.

В данной статье сформулированы предложения по построению и применению в органах внутренних дел Российской Федерации перспективного многофункционального эшелонированного воздушного комплекса на базе летательных аппаратов легче воздуха. Исходя из специфики задач, стоящих перед подразделениями органов внутренних дел, предложены различные варианты построения воздушного комплекса, а также его оснащения разработанными и существующими модулями полезной нагрузки.

Степень разработанности темы. Анализ тактико-технических характеристик беспилотных летательных комплексов тяжелее воздуха

Анализ тактико-технических характеристик беспилотных летательных комплексов тяжелее воздуха, проведен на примере двух современных беспилотных летательных аппаратов тяжелее воздуха Zala и «Орион». Беспилотный летательный аппарат «Орион» [2, с. 7-8] представлен на рисунке 1.



Рис. 1. Беспилотный летательный аппарат «Орион»

БПЛА «Орион» представляет собой комплекс воздушной разведки с беспилотными летательными аппаратами большой продолжительности полета. Максимальная продолжительность полета составляет 24 часа. Максимальная взлётная

масса БПЛА «Орион» равна 1000 килограмм при максимальном весе целевой нагрузки 200 килограмм.

В состав целевой нагрузки БПЛА «Орион» могут входить:

1. Многофункциональная оптико-электронная система с ТВ и ИК каналами (рис. 2) для обнаружения наземных целей в видимом и инфракрасном диапазонах. Кроме того, оптико-электронный модуль обеспечивает измерение дальности до цели и подсветку цели лазерным целеуказателем.



Рис. 2. Многофункциональная оптико-электронная система с ТВ и ИК каналами БПЛА «Орион»

2. Аппаратура радио- и радиотехнической разведки для пеленгации и определения местоположения источников сигналов радиосвязи и радиотехнических средств.

3. Многофункциональная радиолокационная станция, сочетающая функции картографирования поверхности земли в радиолокационном диапазоне и обнаружения стационарных и подвижных объектов.

4. Цифровая аэрофотографическая система.

Беспилотный летательный комплекс безаэродромного базирования ZALA 421-16E5G HD [1] представлен на рисунке 3. Беспилотный летательный аппарат оснащен гибридной силовой установкой, которая позволяет обеспечить, согласно данным производителя, время полета более 12 часов. При этом, максимальная масса целевой нагрузки составляет единицы килограмм (3,5+ килограмм) при максимальной взлётной массе, равной 49,5 килограмм.



Рис. 3. Беспилотный летательный аппарат ZALA 421-16E5G HD

Беспилотный летательный аппарат ZALA 421-16E5G HD обладает широкой гаммой целевых нагрузок [1]. Некоторые образцы целевых нагрузок комплекса ZALA 421-16E5G HD могут быть использованы для оснащения разрабатываемой воздушной платформы, которая будет рассмотрена ниже. Среди важнейших модулей комплекса ZALA 421-16E5G HD можно выделить:

1. D Тепловизор с обзорной видеокамерой и лазерным целеуказателем Z-16IRQ-V/L (рис. 4).



Рис. 4. HD Тепловизор с обзорной видеокамерой и лазерным целеуказателем Z-16IRQ-V/L

Тепловизор обладает следующими техническими характеристиками:

- цифровое увеличение 8x;
- выделение объектов;
- определение температуры;
- запись на борту с разрешением 1280x720 (HD).

Видеокамера обеспечивает запись на борту с разрешением 1920x1080 (Full HD).

2. Гиросtabilизированный лазерный газоанализатор с видеокамерами для поиска утечек метана. На рисунке 5 представлен Газоанализатор с видеокамерами Z-16GAS-M-VR.



Рис. 5. Газоанализатор с видеокамерами Z-16GAS-M-VR

3. Дозиметр с видеокамерами Z-16 GAMMA-VR

Основной задачей дозиметра является детектирование рентгеновского и гамма-излучения с отображением данных на видеопотоке (рис. 6). Две видеокамеры (прицельная и курсовая) обеспечивают фиксацию видеоинформации с разрешениями HD и Full HD.



Рис. 6. Дозиметр с видеокамерами Z-16 GAMMA-VR

4. Мультиспектральная камера и фотоаппарат Z-16AGRO1-F1 (рис. 7).

Мультиспектральная камера обладает следующими тактико-техническими характеристиками:

- разрешение 8 см/пиксель на высоте 120 м;
- поддерживаемые типы спектров: blue, green, red, red edge, near infrared;
- фото RGB 3.4 Мп;
- поддерживаемый формат изображения 12-bit RAW.



Рис. 7. Мультиспектральная камера и фотоаппарат Z-16AGRO1-F1

Фотоаппарат обеспечивает разрешение 24 Мп с матрицей APS-C и объективом 20 мм.

Отметим, что, несмотря на неоспоримые преимущества беспилотных летательных платформ тяжелее воздуха, они обладают столь же несомненными недостатками. Даже столь технически совершенные комплексы, как ZALA 421-16E5G HD и «Орион» могут находиться в воздухе 12 часов и 24 часа соответственно. Дублирование аппаратов для посменного использования приводит к значительному удорожанию эксплуатации. Не менее серьезным является ограничение массы полезной нагрузки. Грузоподъемность беспилотного комплекса ZALA, при всем богатстве выбора целевых грузов, ограничена примерно 3,5 килограммами полезной нагрузки.

Возможности существующих комплексов воздушного базирования тяжелее воздуха могут быть существенно расширены за счёт применения платформ легче воздуха или «...воздухоплавательных летательных аппаратов (ВПЛА)» [4, с. 49].

Достоинства и недостатки современных воздухоплавательных аппаратов.

Современные воздухоплавательные аппараты обладают широкой гаммой неоспоримых преимуществ [6, с.202; 10, с. 448; 9;]:

- возможность длительного нахождения в воздухе, в некоторых случаях до полугода;
- возможность длительного нахождения в одной точке;
- высокие показатели грузоподъемности;
- высота полета вплоть до стратосферной;
- отсутствие необходимости во взлетно-посадочной полосе;
- низкий уровень шума и загрязнения воздуха;
- высокая экономичность эксплуатации;
- простота подготовки пилотов и простота эксплуатации.

Благодаря выдающимся тактико-техническим характеристикам, современные воздухоплавательные аппараты способны выполнять широчайший круг задач, как в интересах силовых ведомств, так и гражданского сектора экономики. В источниках [3, с. 212; 4, с. 49-50; 5, с. 140-141; 10, с. 448] к задачам, стоящим перед ВПЛА относят:

- патрулирование и наблюдение за местностью, в том числе контроль морских и сухопутных границ Российской Федерации;
- радиолокационный контроль воздушного пространства в целях предупреждения о воздушно-космическом нападении;
- создание групп ложных целей;



- обеспечение связи, в том числе ретрансляция сигналов;
- выполнение задач РЭБ с охватом обширной территории, в том числе подавление радиосредств противника в различных диапазонах;
- ведение воздушной разведки, а также радиоэлектронной, радиотехнической и радиоразведки;
- целеуказание и корректировка огня;
- борьба с подводными лодками противника;
- пассажирские перевозки, грузоперевозки, в том числе доставка войск и материальных средств в труднодоступные районы;
- обнаружение мин и составление карт минных полей;
- строительные работы;
- пожаротушение и лесосохрана;
- геодезия и картография;
- фото- и видеосъемка;
- реклама и туризм;
- междисциплинарные научные исследования.

Условно, вышеперечисленные задачи можно разделить на задачи, относящиеся к сфере военного искусства, общегосударственные и научные. К компетенции органов внутренних дел могут быть отнесены только патрулирование и наблюдение за местностью и фото- и видеосъемка. Остальные аспекты применения ВПЛА в органах внутренних дел в известных источниках не рассматривались.

Для решения вышеперечисленных задач разработаны различные виды целевой полезной нагрузки [3, с. 212; 5, с. 140; 9]:

- лазерное оборудование, в том числе лазерные дальномеры;
- технические средства, функционирующие в инфракрасном диапазоне, в том числе приборы ночного видения и тепловизоры;
- оптические технические средства;
- радиолокаторы, функционирующие в различных диапазонах, и радиолокационно-оптические комплексы средств воздушно-космической обороны (ВКО);
- различные разведывательные комплексы;
- технические средства радиоэлектронной борьбы, в том числе средства пеленгования и подавления источников радио- и радиолокационного излучения;
- комплексы связи и ретрансляции сигналов в различных диапазонах;
- комплексы создания ложных целей;
- образцы лазерного и другого перспективного оружия на новых физических принципах;
- различные сканеры;
- геодезическая аппаратура;
- научная аппаратура.

Вышеперечисленные комплексы целевой нагрузки предназначены, в основном, для решения задач боевого обеспечения ВС РФ или гражданского сектора экономики и не учитывают специфику оперативно-розыскной и процессуальной деятельности органов внутренних дел Российской Федерации.

Несмотря на значительный прогресс в теоретических исследованиях, примеров практического применения воздухо-

плавательных летательных аппаратов в ВС РФ не так много. Известно об испытаниях привязного аэростатического комплекса в 2010 году в воздухоплавательном испытательном центре ВВС МО РФ [9]. Однако, испытания привязного аэростатического комплекса, способного поднимать до 500 килограмм полезной нагрузки, в том числе аппаратуру связи и технические средства разведки не привели к серийному производству данных аппаратов.

В отличие от ВС РФ, в органах внутренних дел уже нашли практическое применение воздухоплавательные летательные аппараты. Известен опыт применения привязных аэростатических комплексов в органах внутренних дел для ведения видеонаблюдения. Авиацией МВД эксплуатируются девять привязных аэростатических комплексов (ПАК) типа «Пересвет» (рис. 8) производства ОАО «ДКБА» [7].



Рис. 8. Привязной аэростатный комплекс типа «Пересвет» [7]

Примеры использования ПАК «Пересвет» в МВД для видеонаблюдения представлены на рисунках 9-11.



Рис. 9. Пункт управления привязного аэростатического комплекса «Пересвет»



а)



б)

Рис. 10. Внешний вид привязного аэростатного комплекса «Пересвет»



Рис. 11. Фотография, полученная с помощью видеокamеры расположенной на борту ПАК «Пересвет» (СПб, Исаакиевская площадь, Исаакиевский собор)

Использование дирижаблей для ведения видеонаблюдения существенно расширяет возможности органов внутренних дел, но не полностью использует уникальный потенциал воздухоплавательных летательных аппаратов.

Высокие потенциальные возможности воздухоплавательных летательных аппаратов могут быть реализованы в

органах внутренних дел путем комплексного эшелонированного использования различных типов ВПЛА, оснащенных как существующими модулями полезной нагрузки, так и перспективными модулями полезной нагрузки, предложенными в данной статье.

Сразу оговоримся, что в данной статье рассматриваются только отечественные ВПЛА. Подобный подход обусловлен двумя причинами. Во-первых, 15 июля 2022 года, на внеочередном заседании Государственной думы назначенный вице-премьером глава Минпромторга Денис Мантуров заявил о том, что «...сегодня нужно осуществить поворот от абсолютно рыночной промышленной политики к политике обеспечения технологического суверенитета» [11]. Во-вторых, наряду с Соединенными Штатами Америки, Россия является бесспорным мировым лидером в области дирижаблестроения.

Классификация и технические характеристики существующих воздухоплавательных летательных аппаратов.

В источниках [3-5] принята следующая классификация ВПЛА:

1. Привязные аэростатные комплексы;
2. Классические пилотируемые дирижабли;
3. Беспилотные дирижабли для средних высот;
4. Беспилотные высотные аэростатические платформы;
5. Перспективные транспортные дирижабли.

Анализ каждой из составляющих современного комплекса ВПЛА на конкретных примерах позволит сделать вывод не только о пригодности или непригодности к эксплуатации в органах внутренних дел ВПЛА определенного класса, но и о возможности его включения в состав предложенного в данной статье перспективного многофункционального эшелонированного воздушного комплекса на базе летательных аппаратов легче воздуха.

1. Привязные аэростатные комплексы.

В качестве перспективных привязных аэростатных комплексов (ПАК) для органов внутренних дел Российской Федерации могут быть использованы ПАК Аи-21 «Пума» (рис. 12) и ПАК «Ягуар» (рис. 13) производства НПО «Авгурь-РосАэроСистемы». Привязные аэростатные комплексы «Пума» и «Ягуар» позиционируются производителем, как большие всепогодные стационарные привязные аэростатные комплексы большой грузоподъемности.



Рис. 12. Привязной аэростат большого объема «Пума» [8]



Рис. 13. Привязной аэростат «Ягуар» [8]

Технические характеристики привязных аэростатных комплексов «Пума» и «Ягуар» приведены в таблице 1.

Таблица 1

Технические характеристики привязных аэростатных комплексов «Пума» и «Ягуар» [3, с. 216-217; 4, с. 51; 8]

Характеристика	Au-21 «Пума»	«Ягуар»
Объем, м кубических	12000	6 000
Несущий газ	Гелий	Гелий
Максимальная скорость ветра на удерживающем устройстве, м/сек	46	4
Максимальная скорость ветра на рабочей высоте, м/сек	35	
Полезная нагрузка, кг	до 2250 (1 800 кг [4, с. 51])	до 1 500
Максимальная высота, м	5000	3 500
Энергопотребление нагрузки, кВт	до 25	-
Продолжительность непрерывного боевого дежурства, суток	до 30 (до 25 суток [3, с. 216-217])	до 30
Дальность радиовидимости, км	до 300	до 240

ПАК «Пума» и «Ягуар» являются всепогодными, поскольку способны выдерживать максимальную скорость ветра соответственно до 46 и 42 метров в секунду на удерживающем устройстве. Параметр максимальной скорости ветра на рабочей высоте доступен только для ПАК «Пума» и составляет 35 метров в секунду.

Помимо всепогодности, отличительными особенностями обоих аэростатных комплексов являются большая грузоподъемность и высотность. ПАК «Пума» способен оперировать на высотах до 5 километров с полезной нагрузкой до 2250 килограмм, а ПАК «Ягуар» - на высотах до 3500 метров с полезной нагрузкой до 1500 килограмм. Столь впечатляющие показатели позволяют оснастить привязные аэростатные комплексы широкой гаммой технических средств и комплексов в соответствии с их функциональным предназначением.

В источниках [8, 5, с. 141] к основным функциям ПАК относят:

- наблюдение и контроль территории заданного радиуса;
- обнаружение, распознавание и сопровождение наземных, морских и воздушных целей;
- контроль воздушного пространства в интересах ПВО и ПРО;
- управление воздушным движением в радиусе до 700 км;
- обеспечение связи и ретрансляции сигналов на значительном расстоянии;
- ведение радиоэлектронной и радиотехнической разведки;
- ведение радиоэлектронной борьбы;
- охрану границ;
- обеспечение безопасности крупных военных баз и мест дислокации войсковых соединений;
- обеспечение контроля с воздуха правительственных и общественных мероприятий.

Для выполнения задач, возложенных на привязные аэростатные комплексы, качестве основного оборудования производители предлагают использовать широкий спектр технических средств и комплексов, а именно:

- гиостабилизированные оптико-электронные системы;
- комплексы связи и ретрансляции;
- радиолокационные средства (ПАК «Пума», например, был разработан как носитель радиолокационных станций дальнего обнаружения);
- средства РЭБ;
- средства радиоэлектронной и радиотехнической разведки;
- технические средства целеуказания.

Таким образом, исходя из анализа тактико-технических характеристик, функционального назначения и оснащения привязных аэростатных комплексов «Пума» и «Ягуар», воздухоплавательные аппараты данного типа могут быть использованы в органах внутренних дел уровня субъекта Российской Федерации.

2. Классические пилотируемые дирижабли.

Примером классического пилотируемого дирижабля служит дирижабль Au-30 производства НПО «Авгурь-РосАэроСистемы» (рис. 14).

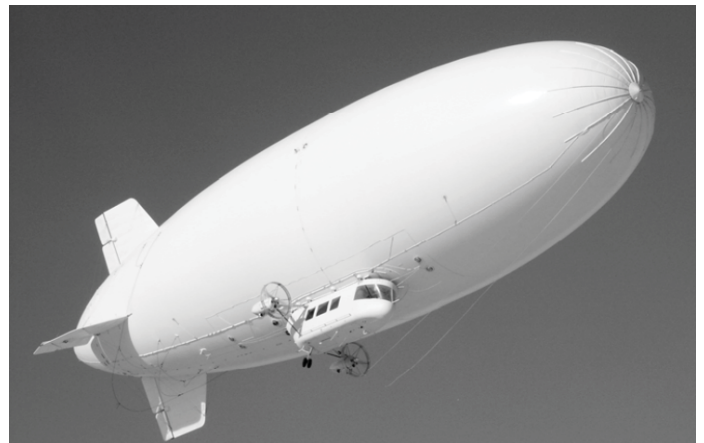


Рис. 14. Пилотируемый дирижабль Au-30

Исходя из анализа источников [3, с. 214; 6, с.204; 8; 9; 10, с. 447], пилотируемый дирижабль Аи-30 представляет собой самый большой в мире серийно выпускаемый мягкий дирижабль, снабженный системой автоматического пилотирования и обладающий сертификатом, не уступающим сертификату всепогодности вертолета при взлете и посадке.

Дирижабль Аи-30 предназначен для контроля линейных объектов топливно-энергетического комплекса, проведения спасательных операций, патрулирования, в том числе на малой высоте и с малой скоростью, проведения фото- и видеосъемки, а даже для туристических целей (способен взять на борт восемь человек).

Важнейшие технические характеристики пилотируемого дирижабля Аи-30 приведены в таблице 2. [3, с. 215; 8; 10, с. 447; 6, с.204; 10, с. 447]

Таблица 2

Технические характеристики пилотируемого дирижабля Аи-30

Характеристика	Аи-30
Объем, м кубических	5065
Полезная нагрузка, кг	1400
Максимальная высота, м	2500
Рабочая высота полета, м	до 1500
Максимальная продолжительность непрерывного боевого дежурства, ч	24
Продолжительность полета на максимальной скорости, ч	5
Оболочка дирижабля	Композитный тканепленочный материал
Силовая установка	2х170 л.с.
Экипаж (стартовая команда), чел	до 2 (4-6)
Взлёт	Вертикальный или с укороченным разбегом

Бортовой комплекс технических средств может состоять из [3, с. 215; 6, с. 204]:

- навигационно-пилотажное оборудование, обеспечивающее круглосуточную эксплуатацию дирижабля;
- системы контроля и фиксации визуальной информации;
- бортового компьютерного комплекса обработки, хранения и передачи изображений;
- системы громкоговорящего вещания;
- прибора ночного видения, а также другого оптического, тепловизионного, лазерного и радиолокационного оборудования;
- поисковых прожекторов и лебедки для подъема и спуска оборудования и людей.

Пилотируемый дирижабль Аи-30 по своим тактико-техническим и эксплуатационным характеристикам не соответствует требованиям органов внутренних дел. Во-первых, максимальная продолжительность непрерывного боевого дежурства пилотируемого дирижабля Аи-30 не превышает 24 часа, что сравнимо с показателями беспилотного летательного аппарата тяжелее воздуха. Во-вторых, необходимость в обслуживающем персонале, пилотах и аэродромной инфраструктуре приводит к значительному удорожанию эксплуатации пилотируемого дирижабля.

3. Беспилотные дирижабли для средних высот.

Дальнейшим развитием проекта нежесткого пилотируемого дирижабля Аи-30 стал проект средневысотной беспилотной многоцелевой платформы большой продолжительности полета «Сокол» (рис. 15), разработанный ЗАО «Воздухоплавательный центр «Авгурь» [5, с. 143-144, 8].

Основным преимуществом беспилотной аэростатической летательной платформы, оснащенной гибридной силовой установкой является возможность длительного непрерывного нахождения в воздухе либо в режиме патрулирования, либо в геостационарном положении.



а)



б)

Рис. 15. Средневысотная беспилотная аэростатическая платформа «Сокол»

Важнейшие технические характеристики беспилотной аэростатической платформы «Сокол» приведены в таблице 3 [8; 4, с. 53; 5, с. 143].

Таблица 3

Технические характеристики беспилотной аэростатической платформы «Сокол»

Характеристика	БАП «Сокол»
Полезная нагрузка, кг	500
Рабочая высота, м	5000-7000
Максимальная (крейсерская) скорость, км/ч	120 (72)
Максимальная продолжительность полёта, сут	10 (при средней скорости ветра 15 м/с)
Силовая установка	Гибридная на основе топливных элементов и аккумуляторов с приводом воздушных винтов от электродвигателей

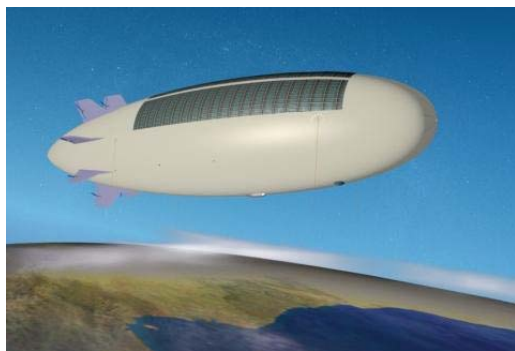
В источниках [4, с. 53; 5, с. 142-143; 8] к основным целевым функциям беспилотной аэростатической платформы «Сокол» относят:

- ведение всех видов разведки, наблюдения и патрулирования;
- ведение радиоэлектронной борьбы;
- борьба с контрабандой на море;
- охрана границ и зон экономических интересов;
- проведение контртеррористических мероприятий;
- обеспечение ретрансляции, связи и управления войсками;
- усиление систем раннего предупреждения об угрозе нападения, решение задач противоракетной и противовоздушной обороны.

Основываясь на анализе функционального назначения и тактико-технических характеристик средневысотной беспилотной аэростатической платформы «Сокол» можно сделать однозначный вывод о пригодности данного ВПЛА для использования в органах внутренних дел. Воздухоплавательные аппараты данного типа могут быть использованы в качестве мобильной компоненты, дополняющей привязные аэростатные комплексы, на уровне субъекта Российской Федерации.

4. Беспилотные высотные аэростатические платформы.

Проект перспективной беспилотной высотной аэростатической платформы «Беркут» планируется реализовать на базе беспилотного дирижабля с гибридной силовой установкой, которая сочетает использование комплексное использование гибких пленочных солнечных батарей, генераторов и аккумуляторов, построенных на принципах водородной энергетики [3, с. 216; 5, с. 143-144; 8].



а)



б)

Рис. 16. Беспилотная высотная аэростатическая платформа «Беркут».

Основные технические характеристики [3, с. 216; 4, с. 54; 5, с. 143; 8] беспилотной высотной аэростатической платформы «Беркут» (рис. 16) отражены в таблице 4.

Таблица 4

Основные технические характеристики беспилотной высотной аэростатической платформы «Беркут»

Характеристика	Беркут ET широты (0-30 град.)	Беркут ML широты (30-45 град.)	Беркут HL широты (45-60 град.)
Объем, м кубических	192 000	256 000	320 000
Площадь элементов солнечной батареи, метров квадратных	3 500	5 800	8 000
Полезная нагрузка, кг	1000 (1200)		
Мощность, потребляемая полезной нагрузкой, кВт	15		
Высота базирования, км	от 20 до 23		
Продолжительность непрерывного боевого дежурства, месяцев	6 (12 месяцев [5, с. 143])		
Силовая установка, двигателей	3x50 кВт	5x50 кВт	7x50 кВт

Сферы применения беспилотной высотной аэростатической платформы «Беркут» [8; 5, с. 143-144]:

- комплексный мониторинг территории радиусом 600 километров (оснащение радаром и стабилизированной оптикоэлектронной системой);
- эффективная замена геостационарным спутникам;
- решение задач ПВО и ПРО (оснащение радаром с активной фазированной антенной решеткой);
- обеспечение антитеррористических и антиконтрабандных операций;
- обеспечение широкополосной связи и ретрансляции сигналов, в том числе в интересах ВС РФ;
- ведение радиоэлектронной борьбы;
- обнаружение и идентификация наземных и морских объектов.

Беспилотная высотная аэростатическая платформа «Беркут» может использоваться в органах внутренних дел не только для выполнения задач в соответствии с функциональным предназначением, но и для координации действий органов внутренних дел в масштабе федерального округа. Другими словами, воздухоплавательные аппараты типа «Сокол» предназначены для применения в качестве второго эшелона для комплекса воздухоплавательных летательных аппаратов первого эшелона, в который входят привязные аэростатные комплексы «Пума» и «Ягуар», а также средневысотные беспилотные аэростатические платформы «Сокол», действующие на уровне субъекта Российской Федерации.

Отметим, что среди основных целевых функций всех типов воздухоплавательных летательных аппаратов, рассмотренных выше, перечислены, в основном, функции, относящиеся либо к боевому обеспечению Вооруженных Сил Российской Федерации, либо к сфере гражданской экономики, либо к научной сфере. Использование воздухоплавательных летательных аппаратов ограничивается, в известных источ-

никах, обеспечением наблюдения и контроля, а также обеспечением связи и ретрансляции сигналов.

Специфика органов внутренних дел не подразумевает ведения радиоэлектронной и радиотехнической разведки, а также радиоэлектронной борьбы в их классическом понимании. Однако, с учетом специфики оперативно-розыскной деятельности, некоторый функционал в данной области должен быть заложен в возможности привязного аэростатного комплекса, предназначенного для органов внутренних дел.

Отметим также, что одновременное использование технических средств радиоэлектронной борьбы и комплексов ретрансляции и связи требует, как минимум, их согласованного применения.

Перспективные модули полезной нагрузки для воздухоплавательных летательных аппаратов, которые позволят не только расширить их функционал, но и учесть специфику различных сфер деятельности органов внутренних дел, будут рассмотрены в разделе 4 данной статьи «Предложения по формированию перспективного эшелонированного комплекса ВПЛА для органов внутренних дел Российской Федерации».

5. Перспективные транспортные дирижабли.

Несмотря на то, что обеспечение транспортных функций в интересах органов внутренних дел не рассматривается в данной статье, нельзя не отметить возможность использования транспортных дирижаблей для доставки грузов в удаленные труднодоступные районы.

Подчеркнем, что в источниках [3-5] принята классификация ВПЛА, которая включает перечисленные выше пять категорий воздухоплавательных аппаратов, а именно привязные аэростатные комплексы, пилотируемые дирижабли, средневысотные беспилотные дирижабли и транспортные дирижабли. На наш взгляд, в данной классификации незаслуженно обойден вниманием перспективный класс малых (до 50 килограмм нагрузки) и ультрамалых (до 20 килограмм нагрузки) воздухоплавательных летательных аппаратов. Разработка аппаратов данного класса позволит в полной мере учесть, прежде всего, специфику оперативно-розыскной деятельности органов внутренних дел. Подобный легкий аппарат, в отличие от БПЛА тяжелее воздуха, может скрытно и бесшумно зависнуть на расстоянии, позволяющем осуществлять не только фиксацию визуальной информации, но и фиксацию аудиоинформации.

Анализ источников [3-5] показал, что в состав известных комплексов ВПЛА для силовых ведомств могут входить от пяти до двух категорий воздухоплавательных аппаратов:

– привязные аэростаты и дирижабли для решения задач наблюдения и обеспечения связи [3, с. 212];

– ВПЛА всех пяти категорий для оснащения ими перспективного воздухоплавательного сегмента Вооруженных сил РФ [4, с. 49-50];

– многофункциональные привязные аэростатные комплексы, беспилотные дирижабли и аэростатические транспортные летательные аппараты в составе перспективного воздухоплавательного сегмента Вооруженных сил Российской Федерации [5, с. 141];

– привязные аэростаты, беспилотные стратосферные дирижабли и пилотируемые (беспилотные) дирижабли нового поколения «Атлант» в качестве носителей радиолокационно-оптических комплексов и других средств полезной нагрузки [5, с. 140].

Так как ни один из предложенных комплексов ВПЛА для силовых структур не отвечает требованиям и специфике деятельности органов внутренних дел, ниже сформулированы предложения по формированию перспективного эшелонированного комплекса ВПЛА для органов внутренних дел Российской Федерации.

Предложения по формированию перспективного эшелонированного комплекса ВПЛА для органов внутренних дел Российской Федерации

В состав перспективного эшелонированного комплекса ВПЛА для органов внутренних дел Российской Федерации должны быть включены:

1. Малые (до 50 килограмм нагрузки) и ультрамалые (до 20 килограмм нагрузки) привязные и беспилотные воздухоплавательные летательные аппараты (первый эшелон уровня субъекта Российской Федерации, стационарная и мобильная компоненты);

2. Привязные аэростатные комплексы (первый эшелон уровня субъекта Российской Федерации, стационарная компонента);

3. Средневысотные беспилотные дирижабли (первый эшелон уровня субъекта Российской Федерации, мобильная компонента);

4. Беспилотные высотные аэростатические платформы (второй эшелон уровня федерального округа, координация действий органов внутренних дел в масштабе федерального округа).

В зависимости от задач, стоящих перед различными подразделениями органов внутренних дел, каждый из вышеперечисленных ВПЛА может быть укомплектован следующими существующими и перспективными функциональными модулями (рис. 1):

1. Модуль фиксации аудио-визуальной информации с функциями:

- фотофиксации;
- видеофиксации;
- аудиофиксации;
- использования технологии распознавания лиц и номерных знаков, например лучшие в мире алгоритмы от компании NtechLab;

– оперативной проверки полученной фото и видео информации по базам данных разыскиваемых лиц и автомобилей;

– применения искусственного интеллекта для анализа оперативной обстановки (массовое скопление людей, массовые беспорядки);

– интеграции с программно-аппаратным комплексом «Безопасный город».

Использование технических средств фиксации аудио-визуальной информации предлагается в различных источниках. Для реализации данной функции может быть использована

многофункциональная оптико-электронная система с ТВ и ИК каналами БПЛА «Орион» (рис. 2) или мультиспектральная камера и фотоаппарат Z-16AGRO1-F1 БПЛА ZALA (рис. 7).

Отметим, однако, что интеграция в программную составляющую данного модуля алгоритмов распознавания лиц и номеров автомобилей, например алгоритмов компании NtechLab, с возможностью оперативной проверки фото и видео информации по базам данных разыскиваемых лиц и автомобилей нигде не рассматривалась. Применение искусственного интеллекта для анализа оперативной обстановки (массовое скопление людей, массовые беспорядки) и интеграция модуля фиксации аудио-визуальной информации с программно-аппаратным комплексом «Безопасный город» также предложены впервые.

2. Модуль для анализа интернет-трафика мобильных и стационарных беспроводных устройств при проведении ОРМ, в составе которого предлагается использовать:

- оборудование для анализа трафика в мобильных телекоммуникационных сетях;
- оборудование для внедрения ложных сообщений в переписку правонарушителей с целью пресечения массовых беспорядков;
- оборудование для перехвата побочных электромагнитных излучений;
- оборудование для перехвата информации по акустическому каналу.

Данный модуль является перспективным и не представлен в комплектациях известных беспилотных комплексов.

Основной задачей данного модуля является не только введение ложных сообщений в систему связи организаторов массовых беспорядков с целью нарушения единого замысла, но и определение источников сообщений как по IP-адресу, так и по адресу канального уровня (адресу железа). Кроме того, данный модуль должен обеспечить фиксацию информации по различным каналам утечки.

3. Модуль для решения криминалистических задач, который может быть оснащен:

- оборудованием для построения 3D карты места преступления для проведения следственных действий в труднодоступных или опасных местах;
- различной поисковой техникой, в том числе поисково-наблюдательными тепловизорами, идентификаторами изотопов, детекторами гамма-излучения и оборудованием для поиска опасных химических веществ в воздухе.

Данный модуль также является перспективным и не представлен в известных образцах полезной нагрузки. Применение дирижабля, оснащенного оборудованием для построения 3D карты места преступления и поисковой техникой может найти широкое применение при расследовании военных преступлений. В состав модуля для решения криминалистических задач может входить, например, газоанализатор с видеокameraми Z-16GAS-M-VR (фото 5).

4. Модуль фиксации информации в невидимом спектре (многоспектральной разведки), оснащенный:

- оборудованием для фиксации информации в инфракрасном спектре, а именно наблюдательным тепловизором, прибором ночного видения или многоспектральным прибором,

сочетающим различные каналы, например тепловизионный и ночной;

- оборудованием для фиксации гамма-излучения;

Модуль может быть оснащен существующей многофункциональной оптико-электронной системой с ТВ и ИК каналами БПЛА «Орион» (фото 2), мультиспектральной камерой и фотоаппаратом Z-16AGRO1-F1 БПЛА ZALA (рис. 7), HD тепловизором с обзорной видеокameraй и лазерным целеуказателем (рис. 4) или дозиметром с видеокameraми Z-16 GAMMA-VR (рис. 6).

5. Модуль для фиксации информации в радиочастотном спектре, в состав которого может быть включено:

- оборудование для перехвата радиосигнала в HF и VHF диапазонах;
- оборудование для перехвата радиосигнала в GSM, LTE диапазонах;
- оборудование для перехвата радиосигнала Wi-Fi, Bluetooth.

Возможно применение аппаратуры радио- и радиотехнической разведки для пеленгации и определения местоположения источников сигналов радиосвязи и радиотехнических средств из состава БПЛА «Орион».

6. Модуль для подавления сигналов радиодиапазона и искажения сигналов систем геопозиционирования. В состав комплекса входит:

- оборудование для подавления радиосигнала в HF и VHF диапазонах;
- оборудование для подавления радиосигнала в GSM, LTE диапазонах;
- оборудование для подавления радиосигнала Wi-Fi, Bluetooth.

Одной из важнейших задач данного модуля является подавление сетей peer-to-peer связи организованных с использованием аппаратов сотовой связи и специфических приложений. Примером использования подобного вида связи являются массовые беспорядки в Гонконге.

Отметим, что данный модуль целесообразно включить в активную подсистему комплекса ВПЛА и разнести таким образом функцию подавления сигналов и функцию ретрансляции.

7. Модуль многофункционального ретранслятора для усиления радиосигнала в различных диапазонах (VHF, 3G/LTE, Wi-Fi и т. д).

8. Модуль связи с наземным пунктом управления, в состав которого входят:

- оборудование GSM и LTE диапазона;
- i-Fi модуль;
- криптографическое оборудование.

9. Модуль идентификации и геопозиционирования, оснащенный:

- оборудованием ГЛОНАСС или Beidu;
- бортовым передатчиком «Москит» стандарта 1090 ES производства концерна Алмаз Антей для контроля требований использования воздушного пространства.

10. Модуль ИК подсветки и лазерного целеуказания.

Для оснащения данного модуля может быть использован HD тепловизор с обзорной видеокameraй и лазерным целе-

указателем (рис. 4) с дополнительным оснащением модуля устройством ИК-подсветки.

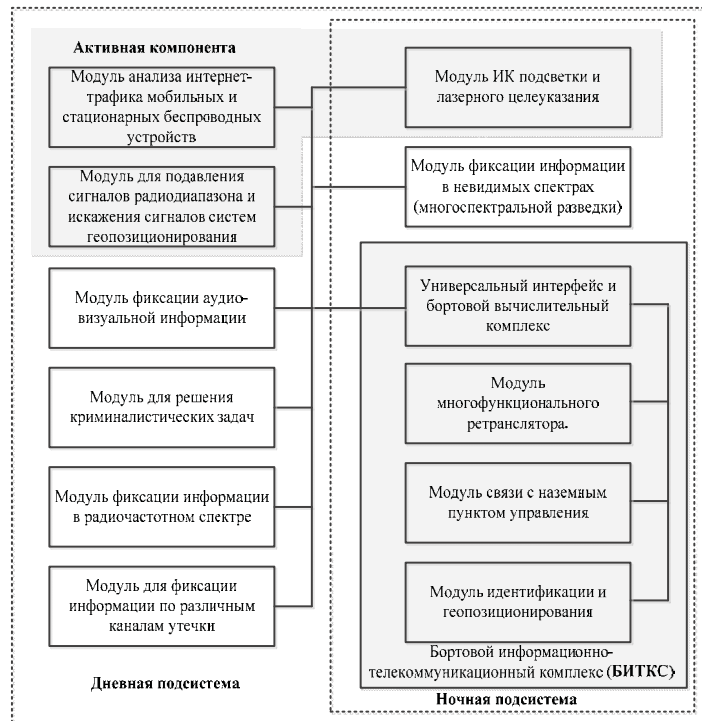


Рис. 17. Функциональная схема полезной нагрузки перспективной беспилотной платформы легче воздуха

При построении перспективной беспилотной платформы легче воздуха целесообразно выделить базовую подсистему, а также «дневную» и «ночную» подсистемы с активной и пассивной компонентой.

Конструкция перспективной беспилотной платформы легче воздуха может включать следующие элементы:

- многосекционный корпус с повышенной живучестью, который может быть дополнительно армирован, в том числе элементами крепления универсальной модульной платформы;
- унифицированную платформу для крепления модулей, которая позволит гибко изменять состав модулей полезной нагрузки;
- четыре электродвигателя для обеспечения улучшенной маневренности платформы;
- универсальный бортовой источник, построенный на принципах водородной энергетики;
- резервный источник питания, в том числе солнечная батарея;
- бортовой информационно-телекоммуникационный комплекс (БИТКС);
- программный комплекс, в том числе с элементами искусственного интеллекта и нейросетевого самообучения.

Помимо конструктивных особенностей платформ, важную роль в вопросе применения платформ воздушного базирования играет управление данными техническими средствами. Для аппаратов тяжелее воздуха необходимо непре-

рывное поддержание каналов связи, управления и геолокации с беспилотными летательными аппаратами. Постоянный обмен информацией представляет собой уязвимое место беспилотной системы тяжелее воздуха, так как значительно снижает её разведзащищенность.

Для управления дирижаблем может быть предложен режим дискретного управления, при котором постоянное управление замещается предустановленной маршрутной программой. Маршрутная программа подразумевает либо нахождение в одной точке, либо движение по определённому маршруту. Маршрутная программа должна быть дополнена синхронизированной функциональной программой, охватывающей выполнение определённых полётных заданий всеми видами модулей воздушной платформы.

Кроме того, возможность не только мобильного, но и стационарного использования дирижабля позволит даже на уровне подразделения органов внутренних дел оценить обстановку с помощью поднятия аппаратуры аудио-визуальной фиксации и принять обоснованное решение на применение сил и средств. При этом, воздушная разведка позволит обеспечить информированность должностных лиц без неоправданного риска для личного состава. Дополнительно, в случае обострения обстановки, может быть организована бесперебойная связь с использованием ретранслятора, установленного на дирижабле. При необходимости, в случае массовых беспорядков, дирижабль может использоваться для патрулирования в зоне ответственности подразделения органов внутренних дел.

Безусловно, использование дирижаблей и беспилотных летательных аппаратов в крупных мегаполисах затрудняется необходимостью получения разрешений на полёты и согласованиями зоны полётов. Однако, оснащение дирижабля бортовым передатчиком «Москит» стандарта 1090 ES производства концерна Алмаз-Антей позволит преодолеть данные ограничения и обеспечить контроль требований по использованию воздушного пространства. Особенно эффективны воздухоплавательные летательные аппараты могут быть при отработке мероприятий вдоль трасс, в лесных массивах и малонаселённой местности.

Конструкция воздушной платформы по схеме дирижабля обладает не только техническими преимуществами, но и оперативно-тактическими достоинствами, выходящими далеко за рамки задач, стоящих перед органами внутренних дел. Среди перечня задач, возложенных на воздухоплавательные летательные аппараты в источниках [3, с. 212; 4, с. 49-50; 5, с. 140-141; 10, с. 448] указана задача патрулирования и наблюдения за местностью, в том числе контроль морских и сухопутных границ Российской Федерации.

Однако, воздушные платформы легче воздуха могут быть задействованы не только для мониторинга границ, но и для прикрытия государственной границы Российской Федерации с воздуха. Беспилотные средневысотные дирижабли могут быть оснащены средствами поражения, например легкой многоцелевой управляемой ракетой (ЛМУР) «305» («Изделие 305»), подобно разведывательно-ударным беспилотным летательным аппаратам, построенным по самолетной и вертолетной схемам. Таким образом, возможность длительного нахождения в воздухе средневысотного беспилотного дири-

жабля обеспечивает немедленное поражение диверсионно-разведывательной группы еще на приграничной территории.

Более того, по своей природе дирижабль неуязвим для антидроновых устройств, основной функцией которых является подавление каналов управления, связи и навигации беспилотного летательного аппарата. В зоне действия антидронного устройства диверсионно-разведывательной группы, в отличие от БПЛА тяжелее воздуха, дирижабль просто останется в воздухе, а не совершит аварийную посадку. Дополнительно, возможна реализация функции автоматического ухода беспилотного дирижабля из зоны воздействия средств РЭБ при потере управления.

Безусловно, дирижабли не лишены недостатков, таких, как [9, 10, с. 448]:

- относительно невысокая скорость полета;
- низкая маневренность дирижабля, обусловленная высоким аэродинамическим сопротивлением аппарата;
- зависимость от атмосферных природных явлений, прежде всего от ветра;
- значительные размеры ангаров для дирижабля;
- сложность хранения и технического обслуживания.

Тем не менее, совместное, комплексное применение воздушных платформ тяжелее воздуха и легче воздуха позволит преодолеть недостатки данных комплексов и многократно усилить их общие достоинства.

Заключение

В статье сформулированы предложения по построению и применению в органах внутренних дел Российской Федерации перспективного многофункционального эшелонированного воздушного комплекса на базе летательных аппаратов легче воздуха. Построение комплекса предполагает двухэшелонную схему: первый эшелон ВПЛА на уровне субъекта Российской Федерации, второй эшелон – на уровне федерального округа, с интеграцией мобильной и стационарной компоненты на первом уровне.

В состав первого эшелона предлагается включить известные образцы привязных аэростатных комплексов (стационарная компонента) и средневысотных беспилотных дирижаблей (мобильная компонента), а также предложенные в данной статье перспективные малые (до 50 кг нагрузки) и ультрамалые (до 20 кг нагрузки) привязные и беспилотные воздухоплавательные летательные аппараты (стационарная и мобильная компоненты). Для построения второго эшелона перспективного многофункционального эшелонированного воздушного комплекса на базе летательных аппаратов легче воздуха предлагается использовать беспилотные высотные аэростатические платформы (мобильная компонента).

Исходя из специфики задач, стоящих перед подразделениями органов внутренних дел, предложены различные варианты построения воздушного комплекса, а также его оснащения существующими и предложенными перспективными модулями полезной нагрузки.

Результаты, полученные в статье, предлагается использовать для дальнейших исследований в области построения

перспективного эшелонированного комплекса ВПЛА, которые предполагается сосредоточить на:

- расчёте тактико-технических характеристик отдельных модулей и всей платформы в целом;
- расчёте тактико-технических характеристик и устойчивости системы ретрансляторов, развертываемой на базе воздухоплавательных аппаратов;
- разработке алгоритма управления координацией множества взаимодействующих воздухоплавательных аппаратов и беспилотных летательных аппаратов тяжелее воздуха.

Литература

1. Сайт компании ZALA AERO GROUP. [Электронный ресурс]. URL: <https://zala-aero.com/production/bvs/zala-421-16e5g-hd/>.
2. Открытый обзор продукции российских производителей специальных средств и техники для обеспечения общественной безопасности: Научно-технический информационный сборник. Вып. 2 (9). М.: ФКУ НПО «СТиС» МВД России, 2021. 68 с.
3. Верба Г.Е., Пономарев П.А., Фёдоров С.В. Создание систем передачи информации и мониторинга на базе воздухоплавательных аппаратов // «Известия ЮФУ. Технические науки». Таганрог: Южный федеральный университет, 2008. №3 (80). С. 212-217.
4. Верба Г.Е., Щугарев С.Н., Ивченко Б.А., Пономарев П.А., Талесников М.В. Современные мировые тенденции создания воздухоплавательной техники в интересах силовых ведомств // «Известия ЮФУ. Технические науки». Таганрог: Южный федеральный университет, 2012. №3 (128). С. 49-58.
5. Пономарев П.А. Роль воздухоплавательного сегмента вооруженных сил Российской Федерации в решении задач по обеспечению военных действий в условиях необорудованных театров военных действий и Арктики // «Известия ЮФУ. Технические науки». Таганрог: Южный федеральный университет, 2014. №3 (152). С. 138-147.
6. Загребяев В.Н., Власов Д.В., Зайцев А.Н. Применение дирижаблей в интересах МЧС и других силовых ведомств // «Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций». Воронеж: Воронежский институт Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, 2015. №1-2 (6). С. 202-205.
7. Барановский А. В Госдуме рассмотрели вопросы воздухоплавания. // «Aviation EXplorer». [Электронный ресурс]. URL: <https://www.aex.ru/docs/3/2014/3/19/1999/>
8. Сайт НПО "РосАэроСистемы". [Электронный ресурс]. URL: <http://rosaaerosystems.ru/airships/>
9. Круглов А. Боевой пузырь. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sovsekretno.ru/articles/boevoy-puzyr/>
10. Андреев Д.А., Марков А.А. Перспективы применения дирижаблей // «Актуальные проблемы авиации и космонавтики». Красноярск: Сибирский государственный университет науки и технологий им. акад. М.Ф. Решетнева, 2017. №13 (2). С. 446-448.
11. Лисицына М.А. Мантуров анонсировал уход от рыночной промышленной политики. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.rbc.ru/economics/15/07/2022/62d13a1f9a79476ad8ac4709>
1. Krasnoyarsk: Siberian State University of Science and Technology. academician M.F. Reshetnev, 2017. №13 (2). Pp. 446-448 (In Rus)
2. Lisitsyna M.A. Manturov announced the departure from the market industrial policy. [Electronic resource]. URL: <https://www.rbc.ru/economics/15/07/2022/62d13a1f9a79476ad8ac4709> (In Rus).

THE USE OF ADVANCED MULTIFUNCTIONAL ECHELONED AERIAL COMPLEX BASED ON LIGHTER THAN AIR AIRCRAFTS IN THE WORK OF INTERNAL AFFAIRS BODIES

YURII A. GRACHEV

St. Petersburg, Russia, super.19692012@yandex.ru

VIKTOR M. SOKOLOV

St. Petersburg, Russia, compas-tfc@mail.ru

NICOLAI M. MELNIKOV

St. Petersburg, Russia, Spnsh1@mail.ru

OLEG V. LOKTIONOV

St. Petersburg, Russia, 5733242@mail.ru

KEYWORDS: Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation, internal affairs bodies, Lighter-Than-Air aircraft; LTA aircraft, tethered aerostatic complex, medium altitude unmanned airship, high-altitude unmanned aerostatic platform

ABSTRACT

Introduction: The paper substantiates a justification for the use of Lighter-Than-Air aircrafts in the interests of the internal affairs bodies of the Russian Federation. **Purpose:** Analysis of existing Heavier-Than-Air unmanned aircrafts and Lighter-Than-Air aircrafts capabilities, as well as review of a wide range of payloads with the aim of synthesis of the multi-level aerial complex destined for the internal affairs bodies. **Results:** Based on the analysis of existing unmanned aerial vehicles and Lighter-Than-Air aircrafts, the article proposes the composition and further use of multifunctional echeloned air complex based on lighter-than-air aircrafts designed for the internal affairs bodies. Taking into consideration the internal affairs bodies tasks specificity, various options of an air complex construction scheme, as well as its equipment with designed and existing payload modules, are proposed. **Practical relevance:** Practical recommendations for the construction of a two-tier scheme air complex for internal

affairs bodies based on Lighter-Than-Air aircrafts have been developed. The first tier is built on well-known samples of tethered balloon complexes (stationary component) and medium-altitude unmanned airships (mobile component), as well as perspective small (up to 50 kilograms of payload) and ultra-small (up to 20 kilograms of payload) tethered and unmanned aerial vehicles (stationary and mobile components) proposed in this article. The second tier comprises the unmanned high-altitude aerostatic platforms (mobile component). **Discussion:** the results obtained in the article are proposed to be used for the calculation of the individual modules performance characteristics, of the performance characteristics of a repeater system built on the basis of airships and for developing an algorithm for the coordination control of the interoperable Lighter-Than-Air aircrafts and Heavier-Than-Air unmanned aircrafts.

REFERENCES

1. ZALA AERO GROUP company website [electronic resource]. URL: <https://zala-aero.com/production/bvs/zala-421-16e5g-hd/>. (In Rus).
2. Open review of the products of Russian manufacturers of special means and equipment for ensuring public safety: Scientific and technical information collection. Issue 2 (9). Moscow: FKU NGO "STIS" of the Ministry of Internal Affairs of Russia, 2021. 68 p. (In Rus).
3. G.E. Verba, P.A. Ponomarev, S.V. Fedorov Creation of information transmission and monitoring systems based on aeronautical devices. *Izvestia SFU. Technical Sciences*. Taganrog: Southern Federal University, 2008. No.3 (80). Pp. 212-217. (In Rus)
4. G.E. Verba, S.N. Shchugarev, B.A. Ivchenko, P.A.

Ponomarev, M.V. Talesnikov Modern world trends in the creation of aeronautical equipment in the interests of law enforcement agencies. *Izvestia SFU. Technical Sciences*. Taganrog: Southern Federal University, 2012. No.3 (128). Pp. 49-58. (In Rus)

5. P.A. Ponomarev The role of the aeronautical segment of the armed forces of the Russian Federation in solving the tasks of ensuring military operations in the conditions of unequipped theaters of military operations and the Arctic. *Izvestia SFU. Technical Sciences*. Taganrog: Southern Federal University, 2014. No.3 (152). Pp. 138-147. (In Rus)

6. V.N. Zagrebaev, D.V. Vlasov, A.N. Zaitsev. The use of airships in the interests of the Ministry of Emergency Situations and other law enforcement agencies. *Modern Technologies for Civil Defense and Emergency Response*. Voronezh: Voronezh Institute of the State Fire Service of the Ministry of the Russian



Federation for Civil Defense, Emergencies and Disaster Response, 2015. No.1-2 (6). Pp. 202-205. (In Rus)

7. A. Baranovsky. The State Duma considered the issues of aeronautics. Aviation EXplorer. [electronic resource]. URL: <https://www.aex.ru/docs/3/2014/3/19/1999/> (In Rus)

8. "RosAeroSystems" Website [electronic resource]. URL: <http://rosaerosystems.ru/airships/> (In Rus)

9. A. Kruglov. Battle bubble. [electronic resource]. URL: <https://www.sovsekretno.ru/articles/boevoy-puzyr/> (In Rus)

10. D.A. Andreev, A.A. Markov Prospects for the use of airships. Actual problems of Aviation and Cosmonautics. Krasnoyarsk: Siberian State University of Science and Technology. academician M.F. Reshetnev, 2017. No.13 (2). Pp. 446-448 (In Rus)

11. M.A. Lisitsyna Manturov announced the departure from the market industrial policy. [Electronic resource]. URL: <https://www.rbc.ru/economics/15/07/2022/62d13a1f9a79476ad8ac4709>. (In Rus)

INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Yurii A. Grachev, PhD, Docent, Head of Department at St. Petersburg University of the Ministry of Internal Affairs, St. Petersburg, Russia, super.19692012@yandex.ru

Viktor M. Sokolov, PhD, Senior lecturer at St. Petersburg University of the Ministry of Internal Affairs, St. Petersburg, Russia, compas-tfc@mail.ru

Nicolai M. Melnikov, PhD, Senior lecturer at St. Petersburg University of the Ministry of Internal Affairs, St. Petersburg, Russia, Spnsh1@mail.ru

Oleg V. Loktionov, PhD, Senior lecturer at St. Petersburg University of the Ministry of Internal Affairs, St. Petersburg, Russia, 5733242@mail.ru

For citation: Grachev Yu.A., Sokolov V.M., Melnikov N.M., Loktionov O.V. The use of advanced multifunctional echeloned aerial complex based on lighter than air aircrafts in the work of internal affairs bodies // H&ES Reserch. 2022. Vol. 14. No. No 2. P. 52-65. doi: 10.36724/2409-5419-2022-14-2-52-65 (In Rus)





www.glonass-forum.ru



НАВИТЕХ

www.navitech-expo.ru



РОСКОСМОС

Конгресс

СФЕРА

26
апреля

2022

ЦВК «ЭКСПОЦЕНТР»



www.glonass-forum.ru

12+

Организатор
форума



Генеральный партнер
форума



Экспертные партнеры
форума



Организатор экспозиции
«Навитех-2022»/спонсор форума



Оператор форума





Конгресс "Сфера"

Уважаемые коллеги!

XV Международный навигационный форум приглашает вас принять участие в Конгрессе "Сфера", который состоится в рамках Форума при поддержке Госкорпорации "Роскосмос".

Конгресс проводится во второй раз. Как и в прошлом году, он объединит мероприятия, посвященные реализации федерального проекта "Комплексное развитие космических информационных технологий "Сфера", развитию отечественных систем спутниковой навигации, спутниковой связи с глобальным покрытием и дистанционного зондирования Земли.

"Сфера" – это федеральный проект, направленный на развитие космических информационных технологий и ликвидацию так называемого "цифрового неравенства".

"Это ещё одно направление, где мы можем осуществить прорыв, потому что качество связи будет такое, что сможет, по сути, заменить кабельную связь и по качеству и охвату всей территории будет не хуже, но должна быть дешевле и доступнее, – говорил Президент России В.В. Путин, запуская проект четыре года назад. – Это в целом может привести к абсолютной революции в сфере связи".

Проект в этом году набирает ускорение. Определены исполнители по приоритетным работам проекта, получено финансирование, начаты первые работы по созданию многоспутниковой орбитальной группировки. Уже в этом году будет запущен демонстрационный космический аппарат для отработки основных технических решений и защиты орбитально-частотного ресурса. Система "Скиф" будет предоставлять услуги широкополосного доступа в интернет в малонаселенных пунктах с неразвитой наземной инфраструктурой. Также с их помощью будет решена задача обеспечения связью Северного морского пути.

"Такую гигантскую страну можно связать только через космос", – сказал Дмитрий Рогозин, генеральный директор Государственной корпорации по космической деятельности "Роскосмос", выступая с презентацией на "Королёвских чтениях" в МГТУ имени Н.Э.Баумана в январе этого года.

Проект "Сфера" призван способствовать ускорению технологического развития Российской Федерации, созданию экспортно-ориентированного сектора в базовых отраслях экономики. Благодаря проекту будет создана самая современная система коммуникаций и мониторинга, включающая как существующую, так и перспективную космическую инфраструктуру. Кроме того, в рамках проекта "Сфера" будет создана система экологического мониторинга, к сотрудничеству с которой Роскосмос активно призывает международные организации.

"Главная задача проекта – улучшение качества жизни и безопасности людей", – заявил первый заместитель генерального директора по развитию орбитальной группировки и перспективным проектам Госкорпорации "Роскосмос" Юрий Урличич на прошлогоднем Конгрессе. Не менее

главная, основополагающая задача "Сферы" – устойчивое развитие России в условиях высококонкурентного мирового рынка цифры.

XV Международный навигационный форум – центральное событие этого года в Российской Федерации и странах ЕАЭС в области коммерческого использования спутниковых навигационных технологий, перспективная платформа для диалога российских и зарубежных экспертов, представителями бизнеса и разработчиками, а также эффективная возможность демонстрации собственных достижений. Ключевые игроки рынка навигационных и смежных технологий представят свои разработки и решения для транспортной логистики, страховой телематики, торговли и промышленности, строительства, сельского хозяйства и геодезии. Будут обсуждаться вопросы применения технологий ГЛОНАСС/ГНСС для беспилотного и подключенного транспорта, "умных" городов и "умной" городской мобильности, контроля над Арктикой и других инновационных направлений. На Форуме планируется проведение дискуссий по вопросам развития частной космонавтики, приоритетам государственной политики и государственно-частного партнёрства в космической отрасли.

В работе Форума примут участие более семидесяти докладчиков-экспертов и порядка тысячи делегатов из четырёхсот компаний и предприятий. Участники получат возможность вступить в прямой диалог с представителями государственных и бизнес-структур, а также научного сообщества по вопросам развития отечественной и зарубежной навигации.

"Сфера" – мощный драйвер роста качества космических услуг, технологий, систем и продуктов в России, и Навигационный форум предоставляет участникам возможность наглядно узнать перспективы развития отрасли.

"Мы хотим, чтобы уверенность в будущем вернулась в нашу отрасль в целом", – заявил генеральный директор Госкорпорации "Роскосмос" Дмитрий Рогозин.

Помимо докладов и дискуссионных мероприятий, на Форуме состоится торжественная церемония вручения ежегодной премии Ассоциации "ГЛОНАСС/ГНСС-Форум" в области навигации.

Организатор Навигационного форума: Ассоциация "ГЛОНАСС/ГНСС-Форум".

Генеральный партнер Форума: Государственная корпорация по космической деятельности "Роскосмос".

Стратегические партнеры Форума: НП "ГЛОНАСС" и НТИ "Автонет".

Оператор Форума: агентство "ПрофКонференции".

Организатор экспозиции "Навитех-2022": АО "Экспоцентр" при поддержке Минпромторга России.

Выставка проводится под патронатом Торгово-промышленной палаты Российской Федерации.

Более подробная информация – на сайтах: <http://www.glonass-forum.ru/> и <https://www.navitech-expo.ru/>.

"Телеком-инфраструктура 2022": что будет со связью в России?

В рамках Российской недели высоких технологий состоится практическая конференция "Телеком-инфраструктура 2022. Будущее сетей и сооружений связи в РФ". Мероприятие пройдет 28 апреля 2022 г. на площадке выставки "СВЯЗЬ-2022".

Регистрация участников, а также подробная информация на сайте: <https://www.tmtconferences.ru/events/ti2022/>

"Телеком-инфраструктура 2022" – правопреемник всероссийской научно-практической конференции "Сети и сооружения связи в РФ. Строительство, эксплуатация и развитие телеком-инфраструктуры". Ее организаторы - оператор деловых мероприятий TMT Conference, "Телеспутник" и ИАА TelecomDaily. Основная повестка в этом году – работа операторов связи в новых экономических условиях, а также поиск путей и решений, которые позволят успешно функционировать и развиваться телекоммуникационным сетям в РФ в ближайшем будущем.

После введения санкций в области поставок и обслуживания высокотехнологичного оборудования телеком-рынок столкнулся с новыми вызовами. Как эксплуатировать, модернизировать и развивать коммуникационные сети, как регулировать ценообразование на услуги связи в текущих условиях, какие элементы телеком-инфраструктуры поддаются импортозамещению, а также как государство намерено поддержать телеком-отрасль и какие шаги им уже сделаны сегодня? Эти и другие актуальные вопросы всесторонне обсудят участники конференции "Телеком-инфраструктура 2022".

Программа конференции будет включать в себя пленарную дискуссию, посвященную новым вызовам, с которыми столкнулись российские операторы наземных сетей связи в результате зарубежных санкций, а также актуальным мерам поддержки отечественной телеком-отрасли со стороны государства и путям обеспечения ее технологического суверенитета. Пленарную дискуссию дополнит технологический поток,

разделенный на несколько практических сессий, посвященных кейсам и решениям по импортозамещению в различных сегментах телекоммуникационной сети – от уровня ядра до последней мили.

Участие в конференции уже подтвердили:

- Александр Меркулов, операционный директор Консорциум "Телекоммуникационные технологии" (АНО ТТ)
- Алексей Маслянкин, директор департамента сети радиодоступа, МТС
- Сергей Яковлев, директор по телеком-бизнесу, ТТК
- Андрей Горбунов, директор В2О, АО "Эр-Телеком Холдинг"
- Роман Венедиктов, исполнительный директор ООО "ГлобалНет"
- Денис Ганза, генеральный директор, ЗАО "Раском"
- Дмитрий Петров, генеральный директор, АО "Комфортел"

Также к участию в конференции "Телеком-инфраструктура 2022" приглашены технические директора и специалисты российских федеральных и региональных операторов связи по проектированию, развитию и эксплуатации сетей связи, разработчики и поставщики аппаратных и программных решений для создания и развития телекоммуникационной инфраструктуры. Кроме того, на мероприятие приглашаются представители ключевых отраслевых регуляторов – Минцифры и Минпромторга РФ, а также профильных федеральных и региональных ведомств и департаментов.

Организаторы Форума: TMT Conference, "Телеспутник" и ИАА Telecom Daily

Партнеры: АО "Экспоцентр", "Комфортел"

По вопросам участия:

Тел.: +7 (812) 448-11-08, +7 (994) 411-61-40

E-mail: conf@tdaily.ru

<https://www.tmtconferences.ru/events/ti2022/>

IX Ежегодный Форум "ECOSYSTEMS-2022. РАЗВИТИЕ ЦИФРОВЫХ ЭКОСИСТЕМ СЕРВИСОВ. Телеком / Банки / Технологические компании"

Открыта регистрация на IX Ежегодный Форум "ECOSYSTEMS-2022. РАЗВИТИЕ ЦИФРОВЫХ ЭКОСИСТЕМ СЕРВИСОВ. Телеком / Банки / Технологические компании", которая пройдет 9 июня 2022 года в Москве. Участники могут зарегистрироваться на сайте мероприятия: <https://ecosystems-forum.ru/>

В ходе мероприятия будет всесторонне рассмотрена проблематика бизнес-экосистем, в комплексе и в части их аспектов и нюансов. Такие вопросы как экосистемы как бизнес – ключевые тренды; развитие потребительского и корпоративного сегментов; регулирование экосистем; технологические инструменты развития экосистем, влияние внешних ограничений (санкций); рынок экосистем и взаимодействия в условиях санкций; зарубежный (в частности, китайский) опыт организации и регулирование цифровых экосистем.

Кроме того, запланирован ряд дискуссий. По таким темам как связь элементов бизнес-экосистемы между собой; рынок и конкурентная среда экосистем. Будет организовано голосование и обсуждение результатов форума – кто эффективнее?

Форум объединит топ-менеджеров, руководителей и представителей телеком компаний, банков, технологических компаний и др., производителей аппаратных средств, разработчиков приложений, вендоров, поставщиков решений и услуг, системных интеграторов, отраслевых и бизнес СМИ, госорганов, отраслевых ассоциаций, экспертного сообщества.

Среди ключевых спикеров - представители компаний МТС, Яндекс, VK, СБЕР, ДОМ.РФ, Ростелеком, Ассоциация ФИНТЕХ и др.

<https://ecosystems-forum.ru>



Новая реальность медиапотребления – на ежегодном TeleMultiMedia Forum 2022

25 мая 2022 года в Москве состоится "TeleMultiMedia Forum 2022: лидеры цифровой медиасферы".

Основная тема 6-го ежегодного форума – изменения в медиапотреблении и телесмотрении под влиянием геополитических и экономических факторов. В рамках пленарного заседания и трех тематических сессий эксперты TeleMultiMedia Forum 2022 обсудят, как перестроится медиатеком в условиях ухода из России крупных зарубежных цифровых платформ и мейджоров, а также прекращения поставок популярного видеоконтента.

Пленарное заседание TeleMultiMedia Forum 2022 будет посвящено трансформации медиапотребления и телесмотрения, происходящей из-за ухода крупных западных мейджоров. В ходе дискуссии представители государства, первые лица крупнейших российских медиахолдингов, поставщиков и производителей видеоконтента, а также операторы цифрового ТВ и ведущие отраслевые аналитики дадут прогнозы о том, как изменится медиапотребление и телесмотрение в стране под влиянием происходящих перемен.

В ходе тематических сессий эксперты TeleMultiMedia Forum 2022 определяют ключевые тренды передела рынка онлайн-видеосервисов и производства оригинального контента в России, а также особенности доставки контента и будущее рынка цифровых платформ в изменившейся реальности.

К участию в TeleMultiMedia Forum 2022 уже приглашены Диана Самошкина (вице-президент по цифровому бизнесу b2c ПАО "Ростелеком"), Александр Нечаев (заместитель генерального директора ВГТРК), Александр Моисеев (заместитель генерального директора "Газпром-медиа"), Антон Горелкин (заместитель председателя Комитета по информационной политике, информационным технологиям и связи), Николай Орлов (председатель комитета по стратегическому развитию медиапроектов при совете директоров Триколора), Игорь Мишин (генеральный директор, "МТС Медиа"), Григорий Кузин (директор проекта "Медиалогистика", MSK-IX), Константин Смирнов (директор департамента цифровых продук-

тов "НТВ-Плюс") и многие другие эксперты рынка медиа, цифрового ТВ и телекоммуникаций в России.

Ключевые темы TeleMultiMedia Forum 2022:

- Медиапотребление в России после ухода западных платформ и правообладателей;
- Новые контентные приоритеты российских вещателей и зрителей;
- Грядущие изменения рекламных возможностях на ТВ и видеоплатформах;
- Технологические трудности, с которыми могут столкнуться производители контента и операторские компании, и как их преодолеть;
- Необходимые меры поддержки и новые подходы к регулированию медиатекома со стороны государства;
- Новые возможности для производства отечественного видеоконтента и развития сотрудничества между операторами услуг цифрового ТВ, онлайн-видеосервисами и поставщиками контента.

На протяжении всего форума будет работать презентационная зона для телеканалов и производителей контента, где можно представить продукты и возможности для операторов и стриминговых компаний. Предусмотрены специальные условия участия, просим за уточнением обращаться к организаторам.

Организаторы Форума: TMT Conference, "Телеспутник" и IAA Telecom Daily

Генеральный партнер: Триколор

Золотой партнер: "Ростелеком"

Серебряный партнер: ivi

Партнер сессии: телекомпания "Первый ТВЧ"

Ключевой партнер: "Медиалогистика" проект "МСК-IX"

Оргкомитет форума:

Тел.: +7 (812) 448-11-08, +7 (994) 411-61-40

E-mail: conf@tdaily.ru

Регистрация участников, а также подробная информация на сайте: <http://www.tmtconferences.ru/events/tmm2022/>





SATELLITE RUSSIA & CIS

Спутниковая связь и космические аппараты на разных орбитах в эпоху глобальной трансформации отрасли



Уважаемые дамы и господа!

COMNEWS приглашает Вас и Ваших коллег принять участие в XIV Международной конференции "Satellite Russia & CIS: спутниковая связь и космические аппараты на разных орбитах в эпоху глобальной трансформации отрасли".

Дата и место проведения: 7 апреля 2022 года, в павильоне "Умный город", (г. Москва, ВДНХ, проспект Мира 119, строение 461)

Сайт мероприятия: <https://www.comnews-conferences.ru/ru/conference/satellite2022>

Мы заботимся о здоровье участников и хотим обеспечить возможность выступления для представителей отрасли из разных стран мира, поэтому в 2022 году конференция состоится в формате phygital – то есть одновременно и в физическом, и в онлайн-режиме.

Конференция SATELLITE RUSSIA & CIS – это единственное в России независимое мероприятие по темам спутниковой связи и вещания, а также производства ракетно-космической техники и пусковых услуг. На SATELLITE RUSSIA & CIS ежегодно присутствуют представители всех конкурирующих компаний из каждой ниши рынка: от разработки, производства, запуска космических аппаратов до услуг фиксированной / мобильной спутниковой связи и дистанционного зондирования Земли.

Satellite Russia & CIS 2022 – это:

- Главная ежегодная площадка для обсуждения "горячих" тем и обмена опытом между российскими и зарубежными игроками рынка спутниковой связи;
- Открытый диалог между партнерами о текущих и перспективных проектах в России и СНГ;
- Демонстрация новейших решений и технологий для обеспечения развития бизнеса;
- Более 200 участников и 30 экспертных выступлений: панельная дискуссия, практические доклады, круглые столы и дебаты
- Места для встреч и переговоров: отличные возможности для делового общения и новых контактов
- Нетворкинг, инсайты;
- Репортажи с зоны выставки
- Поддержка ведущих отраслевых ассоциаций и объединений участников рынка.

Программа конференции SATELLITE RUSSIA & CIS 2022 охватывает все аспекты и сектора рынка спутниковой связи и вещания – от предоставления услуг связи, вещания и ДЗЗ до производства космических аппаратов и наземного оборудования, пусковых услуг и коммерциализации космической деятельности.

Ключевые темы Satellite Russia & CIS 2022:

- Национальное производство космических аппаратов, ракет-носителей и приборов/узлов/модулей для них
- Импортзамещение в спутниковой связи
- АИТ-центр как главная площадка для тестирования спутников
- Финансирование космических программ: кредитование, страхование, юридические аспекты
- Государственно-частного партнерства в космической отрасли
- Спутниковая связь в социально и политически значимых регионах России
- Перспективы применения российских спутников связи для связи на Северном морском пути
- Технологии спутниковой связи для безэкипажного судовождения
- Частные инвестиции в космос: системы спутниковой связи на низких орбитах, новые средства выведения
- Новые возможности рынка спутниковой связи и встраивание в экосистему 5G
- Корпоративные сети на основе спутниковых каналов связи
- Развитие негеостационарных спутниковых систем и место спутниковых технологий на рынке IoT
- Изменения на рынке производства наземного оборудования спутниковой связи.
- Космические технологии в борьбе за экологию
- "Синдром Кесслера": проблема космического мусора уже сегодня

В конференции SATELLITE RUSSIA & CIS 2022 примут участие представители регулирующих органов, руководители российских и зарубежных операторов спутниковой связи, телерадиокомпаний и операторов вещательных сетей, разработчиков / производителей спутников и космического оборудования, провайдеров пусковых услуг, финансовых и страховых компаний, участники рынка New Space, консультанты, отраслевые и деловые СМИ, профильные представители корпоративных потребителей услуг спутниковой связи.

Ждем Вас на конференции Satellite Russia & CIS 7 апреля!

С уважением, оргкомитет конференции
Email: conf@comnews.ru

Продюсер конференции – Анна Кочура, e-mail: ak@comnews.ru.

По вопросам спонсорского участия, пожалуйста, обращайтесь к Ирине Глухой, директор по развитию бизнеса ComNews: irina@comnews.ru

По вопросам делегатского участия, пожалуйста, обращайтесь к Ольге Доленко, руководителю отдела делегатских продаж ComNews: od@comnews.ru

IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE

«2022 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications» (SYNCHROINFO-2022)

**29 июня – 1 июля 2022 года,
г. Архангельск**

СЕКЦИИ КОНФЕРЕНЦИИ:

1. Инфокоммуникационные системы и устройства синхронизации
2. Устройства генерирования и формирования сигналов
3. Системы и устройства приема и обработки сигналов
4. Специальная секция: “Проблемы СВЧ электроники” им. В.А. Солнцева
5. Фотоника и математика для движущихся объектов

Доклады участников конференции на английском языке будут включены в Программу Публикаций Конференций IEEE (IEEE Conference Publication Program (CPP)) – IEEE Explore, возможна индексация в Scopus и WoS

Язык предоставления материалов английский + русский (по желанию)

Доклады участников конференции на русском языке будут опубликованы в журнале “СИНХРОИНФО” и размещены в РИНЦ

Оргкомитет конференции:

Тел.: +7(926) 218-82-43

Адрес для отправки заявок и материалов: synchroconf@media-publisher.ru

ОРГАНИЗАТОРЫ:

Институт Инженеров Электротехники и Электроники (IEEE)
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП)
Издательский дом "Медиа Паблишер"

IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE

**«WAVE ELECTRONICS AND ITS
APPLICATION IN INFORMATION AND
TELECOMMUNICATION SYSTEMS»
(WECONF-2022)**

30 мая - 3 июня 2022 года, г. Санкт-Петербург,

Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения (ГУАП)

Доклады участников конференции будут включены в Программу Публикаций Конференций IEEE (IEEE Conference Publication Program (CPP)) – **IEEE Explore**, возможна индексация в **Scopus**

Секции конференции:

1. Акустооптика
2. Акустоэлектроника
3. Оптические методы обработки информации
4. Обработка и передача информации в инфокоммуникационных системах
5. Круглый стол "Акустооптика и акустоэлектроника: проблемы, перспективы и области применения"
6. Встроенные микроэлектронные системы
7. Электромеханика и системы управления
8. Моделирование и ситуационное управление качеством в радиоэлектронике и приборостроении
9. Приборостроение и интеллектуальные транспортные системы

Оргкомитет конференции:

Тел.: +7(926) 218-82-43

Адрес для отправки заявок и материалов: weconf@media-publisher.ru