

МИНИСТЕРСТВО ЦИФРОВОГО РАЗВИТИЯ, СВЯЗИ И МАССОВЫХ КОММУНИКАЦИЙ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ И ИНФОРМАТИКИ»

Вестник СибГУТИ Том 16, № 4, 2022

Выпускается ежеквартально, выходит с 2007 г.

Учредитель –

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики»

Председатель редакционного совета А. Н. Фионов, д.т.н., проф.

Редакционный совет:

С. С. Абрамов, д.т.н., доц.	В. И. Носов, д.т.н., проф.
В. Б. Барахнин, д.т.н., доц.	С. В. Поршневу, д.т.н., проф.
В. М. Белов, д.т.н., проф.	А. С. Родионов, д.т.н., доц.
В. Н. Васюков, д.т.н., проф.	А. И. Романенко, д.ф.-м.н., проф.
В. Ю. Васильев, д.х.н., доц.	Б. Я. Рябко, д.т.н., проф.
Н. И. Горлов, д.т.н., проф.	И. И. Рябцев, д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН
Н. Л. Казначеева, д.э.н., доц.	Э. Сименс, д.т.н.
В. С. Канев, д.т.н., проф.	О. В. Стукач, д.т.н., доц.
А. И. Карпович, д.э.н., проф.	В. К. Трофимов, д.т.н., проф.
М. Г. Курносов, д.т.н., проф.	А. И. Фалько, д.т.н., проф.
В. В. Лебедянцев, д.т.н., проф.	С. В. Федоренко, д.т.н., доц.
А. В. Лихачёв, д.т.н.	Б. Г. Хаиров, д.э.н., доц.
С. Н. Мамоиленко, д.т.н., доц.	А. Г. Черевко, к.ф.-м.н., доц.
О. Г. Мелентьев, д.т.н., проф.	С. В. Шидловский, д.т.н.
Р. В. Мещеряков, д.т.н., проф.	Ю. И. Шокин, д.ф.-м.н., акад. РАН
И. Г. Неизвестный, д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН	В. П. Шувалов, д.т.н., проф.
С. Н. Новиков, д.т.н., доц.	

Редакция:

А. Н. Фионов (главный редактор), М. Ю. Галкина (заведующая редакцией),
Н. А. Двуреченская (технический и литературный редактор, компьютерная вёрстка),
Т. А. Алфёрова (лингвист-корректор).

Адрес редакции и издателя

630102, г. Новосибирск, ул. Кирова, д. 86

e-mail: vestnik@sibguti.ru

Информация о журнале доступна в сети Internet по адресу <https://vestnik.sibsutis.ru/jour>.

Журнал включён в Перечень ВАК российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёных степеней доктора и кандидата наук.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия, свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-25835 от 29.09.2006. ISSN 1998-6920. Подписной индекс в каталоге «Урал-Пресс» – 82519.

Дата выхода в свет 29.12.2022. Отпускная (редакционная) цена 750 руб.

Отпечатано в издательском центре СибГУТИ по адресу: 630102, г. Новосибирск, ул. Кирова, д. 86.

Бумага офсетная, формат А4. Тираж 300 экз.

© СибГУТИ, 2022 г.

СОДЕРЖАНИЕ

В. Г. Арсентьев, Г. И. Криволапов

О компенсационном методе в электронных измерениях 3

И. В. Гришин, Г. А. Фокин

Оценка допустимого углового разноса устройств для сценария
диаграммообразования в сверхплотных сетях радиодоступа
миллиметрового диапазона 10

Е. С. Антипова

Математическое моделирование конкуренции двух идеологий с внутренними
конфликтами 27

Э. В. Прощенок, А. Ю. Родионов

Анализ современных видов манипуляции сигнала беспроводных систем связи 43

М. Г. Шалыгин, Г. Н. Макаров

Концепция формирования среды для продвижения инновационных разработок,
созданных в высших учебных заведениях 59

С. Б. Жанаева

К вопросу о подготовке данных при разработке модели нейронной сети 69

К. А. Гайдук, А. Ю. Исхаков

К вопросу о реализации алгоритмов выявления внутренних угроз с применением
машинного обучения 80

А. Г. Черевко, И. В. Антонова, А. Г. Марьясов, А. А. Черевко

Модель проводимости печатных графеновых пластин 96

О компенсационном методе в электронных измерениях

В. Г. Арсентьев, Г. И. Криволапов

Рассматривается методическая база применения метода когерентной компенсации узкополосных помех для измерений характеристик электрических сигналов и физических величин.

Ключевые слова: электронные измерения, квадратурный автокомпенсатор, многофункциональный измерительный прибор.

1. Введение

Электронные измерения являются составной частью общей науки об измерениях – метрологии и измерительной техники. Само название «электронные измерения» отражает два целеполагающих обстоятельства:

- целевое назначение – измерения в электронике и других областях, использующих электронные устройства и системы;
- выполнение измерений на основе методов электронной техники и радиотехники, построение измерительных приборов, основой которых служат электронные (микроэлектронные) компоненты.

Объектами электронных измерений являются физические величины, характеристики электрических сигналов, электронных цепей и их режимов. Понятие цепи в электронике и радиотехнике трактуется достаточно широко – оно включает в себя технические устройства для преобразования, передачи и приёма различных сигналов.

Различают прямые и косвенные измерения [1]. Прямыми называются измерения, при которых искомые характеристики объектов измерений находят непосредственно из опытных данных. Косвенные измерения характеризуются тем, что искомые характеристики объектов измерений находят по соответствующим математическим зависимостям между искомыми характеристиками и характеристиками, полученными путём прямых измерений.

В статье рассматривается возможность применения метода когерентной компенсации узкополосных помех [2, 3] с реализацией в виде квадратурного автокомпенсатора по новому назначению – для косвенных измерений таких характеристик электрических сигналов, как разность фаз, отношение амплитуд, корреляционная функция, и таких физических величин, как активное сопротивление, индуктивность и ёмкость, что указывает на привлекательность использования метода с точки зрения практической реализации многофункционального измерительного прибора.

Следует заметить, что в настоящее время для измерений указанных характеристик электрических сигналов и физических величин используются специализированные измерительные приборы. Для измерений разности фаз – фазометры с преимущественно цифровыми методами измерения [4], для измерений отношения амплитуд – измерители отношений [5] прямого или косвенного действия, для измерений корреляционной функции – коррелометры с разновидностями мультипликативного метода или метода преобразования Фурье [1], для измерений

активного сопротивления, индуктивности и ёмкости – измерители R , L , C , базирующиеся в основном на мостовом методе [6].

Вопросы аппаратно-программной реализации метода когерентной компенсации и его метрологические характеристики заслуживают отдельного внимания и в данной публикации не рассматриваются.

2. Измерение разности фаз и отношения амплитуд сигналов

Взаимосвязь функциональных операций квадратурного автокомпенсатора (КА) для адаптивной когерентной компенсации выбранных сигналов $u_1(t)$ и $u_2(t)$ представлена на рис. 1 в виде графической структуры. Такая конфигурация КА может служить ядром многофункционального измерительного прибора.

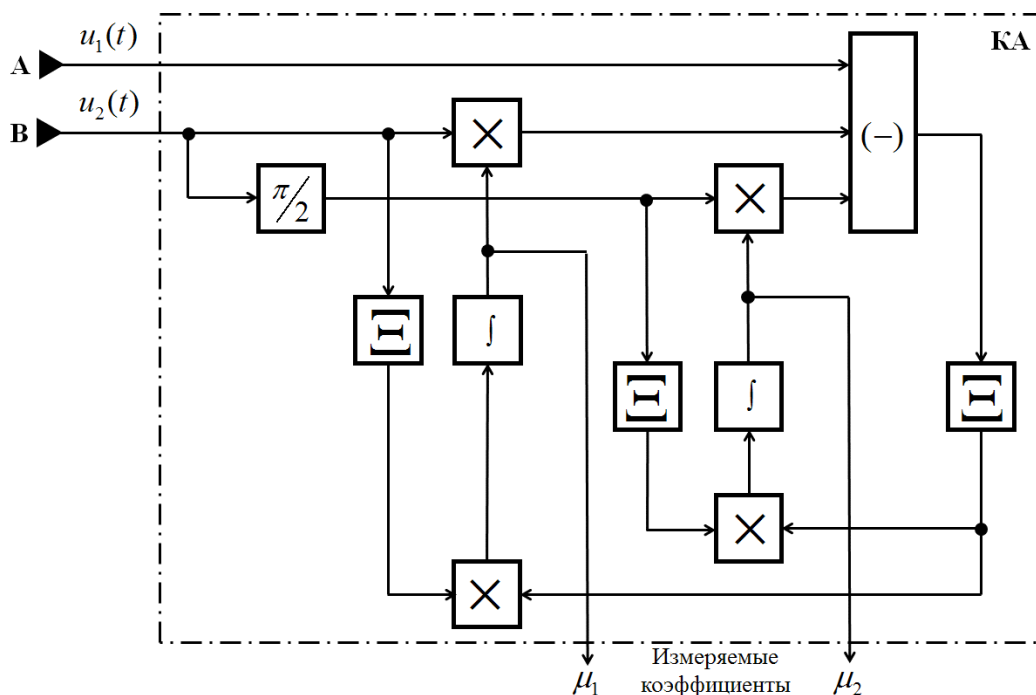


Рис. 1. Схема функциональных операций квадратурного автокомпенсатора

В КА на рис. 1 необходимые для адаптивной когерентной компенсации сигналов $u_1(t)$ и $u_2(t)$ функциональные операции имеют следующие обозначения: $\pi/2$ – операция изменения начальной фазы колебаний сигнала $u_2(t)$ на 90° ; $\times$ – операция перемножения сигналов; Ξ – операция предельного ограничения сигнала; $\int$ – операция интегрирования сигнала; $(-)$ – операция вычитания из сигнала $u_1(t)$ взвешенных с коэффициентами μ_1 и μ_2 квадратурных составляющих сигнала $u_2(t)$.

Представленная структура КА реализует градиентный алгоритм наискорейшего спуска [2, 3] с минимизацией разности сигналов $u_1(t) - u_2(t)$ и стабилизацией времени установления переходного процесса компенсации (времени адаптации) за счёт предельного ограничения перемножаемых сигналов в цепях корреляционных обратных связей.

Представим входные сигналы $u_1(t)$ и $u_2(t)$ КА, разность фаз и отношение амплитуд которых подлежат измерению, в виде детерминированных сигналов:

$$u_1(t) = U_1 \sin(2\pi ft + \varphi_1); u_2(t) = U_2 \sin(2\pi ft + \varphi_2), \quad (1)$$

где $U_1, U_2, \varphi_1, \varphi_2, f$ – амплитуды, начальные фазы и частота входных сигналов.

Сигнал $u_2(t)$ после изменения начальной фазы колебаний на 90° имеет вид:

$$u_2^*(t) = U_2 \cos(2\pi ft + \varphi_2). \quad (2)$$

В установившемся режиме КА (после завершения переходного процесса когерентной компенсации сигналов $u_1(t)$ и $u_2(t)$) квадратурные коэффициенты взвешивания μ_1 и μ_2 определяются соотношениями [2]:

$$\mu_1 = H_1 \Phi_{11}^{-1}; \quad \mu_2 = H_2 \Phi_{22}^{-1}, \quad (3)$$

где функциональные параметры

$$\begin{aligned} H_1 &= f \int_0^{1/f} u_1(t) u_2(t) dt = \frac{U_1 U_2}{2} \cos \Delta \varphi_{12}; \quad H_2 = f \int_0^{1/f} u_1(t) u_2^*(t) dt = \frac{U_1 U_2}{2} \sin \Delta \varphi_{12}; \\ \Phi_{11} &= \Phi_{22} = f \int_0^{1/f} u_2(t) u_2(t) dt = f \int_0^{1/f} u_2^*(t) u_2^*(t) dt = \frac{U_2^2}{2}; \\ \Phi_{11}^{-1} &= \Phi_{22}^{-1} = \frac{2}{U_2^2}; \quad \Delta \varphi_{12} = \varphi_1 - \varphi_2. \end{aligned} \quad (4)$$

Соотношения (3) с учётом (4) преобразуются к виду:

$$\mu_1 = \frac{U_1}{U_2} \cos \Delta \varphi_{12}; \quad \mu_2 = \frac{U_1}{U_2} \sin \Delta \varphi_{12}, \quad (5)$$

откуда видно, что искомая разность фаз $\Delta \varphi_{12}$ сигналов, вычисляемая на основе измеренных квадратурных коэффициентов взвешивания, будет равна

$$\Delta \varphi_{12} = \arctg \frac{\mu_2}{\mu_1}; \quad \Delta \varphi_{12} \in [-\pi/2 \div \pi/2]. \quad (6)$$

Для расширения диапазона значений измеряемой разности фаз от $\pm \pi/2$ до $\pm \pi$ необходимо учитывать сочетания знаков измеренных квадратурных коэффициентов взвешивания μ_1 и μ_2 , при этом разность фаз рассчитывается по формуле:

$$\Delta \varphi_{12} = \left\{ \begin{array}{l} \arctg[\mu_2 / \mu_1], \text{ если } \mu_1 > 0, \mu_2 \geq 0 \\ \pi/2, \text{ если } \mu_1 = 0, \mu_2 > 0 \\ \pi/2 - \arctg[\mu_1 / \mu_2], \text{ если } \mu_1 \leq 0, \mu_2 > 0 \\ \pi, \text{ если } \mu_2 = 0, \mu_1 < 0 \\ \arctg[\mu_2 / \mu_1], \text{ если } \mu_1 > 0, \mu_2 \leq 0 \\ -\pi/2, \text{ если } \mu_1 = 0, \mu_2 < 0 \\ -\pi/2 - \arctg[\mu_1 / \mu_2], \text{ если } \mu_1 \leq 0, \mu_2 < 0 \\ -\pi, \text{ если } \mu_2 = 0, \mu_1 < 0 \end{array} \right\}; \quad (7)$$

$$\Delta \varphi_{12} \in [-\pi \div +\pi].$$

Из соотношений (5) следует очевидная зависимость:

$$\frac{U_1}{U_2} = \sqrt{\mu_1^2 + \mu_2^2}, \quad (8)$$

которая позволяет по измеренным квадратурным коэффициентам взвешивания μ_1 и μ_2 КА определить отношение амплитуд сигналов $u_1(t)$ и $u_2(t)$, являющееся мерой коэффициентов передачи, преобразования, усиления, затухания различных радиоэлектронных устройств и цепей.

При схемотехнической реализации КА представленной на рис. 1 структуры, когда необходимые для адаптивной когерентной компенсации сигналов $u_1(t)$ и $u_2(t)$ функциональные операции выполняются посредством соответствующих электронных устройств, в формулах (6),

(7) следует осуществить замену: $\mu_1 \Rightarrow \nu_1$, $\mu_2 \Rightarrow \nu_2$, где ν_1 и ν_2 – измеряемые величины постоянных напряжений после операции интегрирования, а в формуле (8) заменить: $\mu_1 \Rightarrow k_1 \nu_1$, $\mu_2 \Rightarrow k_2 \nu_2$, где k_1 и k_2 – коэффициенты преобразования (с размерностью 1/В) устройств перемножения сигналов $u_2(t) \times \nu_1$ и $u_2^*(t) \times \nu_2$, причём напряжения ν_1 и ν_2 измеряются в вольтах.

3. Измерение корреляционной функции

Для используемого ранее представления (1) входных сигналов КА функция их взаимной корреляции $B_{12}(\tau)$ имеет вид:

$$B_{12}(\tau) = f \int_0^{1/f} u_1(t+\tau)u_2(t)dt = \frac{U_1 U_2}{2} \cos(2\pi f\tau + \Delta\varphi_{12}), \quad (9)$$

где τ – задержка сигнала $u_1(t)$ относительно сигнала $u_2(t)$.

При этом для установившегося режима КА (см. рис. 1) функциональные параметры (4) характеризуются соотношениями:

$$\begin{aligned} H_1(\tau) &= f \int_0^{1/f} u_1(t+\tau)u_2(t)dt = \frac{U_1 U_2}{2} \cos(2\pi f\tau + \Delta\varphi_{12}); \\ H_2(\tau) &= f \int_0^{1/f} u_1(t+\tau)u_2^*(t)dt = \frac{U_1 U_2}{2} \sin(2\pi f\tau + \Delta\varphi_{12}); \\ \Phi_{11} = \Phi_{22} &= f \int_0^{1/f} u_2(t)u_2(t)dt = f \int_0^{1/f} u_2^*(t)u_2^*(t)dt = \frac{U_2^2}{2}; \quad \Phi_{11}^{-1} = \Phi_{22}^{-1} = \frac{2}{U_2^2}, \end{aligned} \quad (10)$$

а квадратурные коэффициенты взвешивания (3) будут равны:

$$\mu_1(\tau) = \frac{U_1}{U_2} \cos(2\pi f\tau + \Delta\varphi_{12}); \quad \mu_2(\tau) = \frac{U_1}{U_2} \sin(2\pi f\tau + \Delta\varphi_{12}). \quad (11)$$

Из сопоставления зависимостей (9) и (11) следует, что функция взаимной корреляции $B_{12}(\tau)$, схема измерения которой иллюстрируется рис. 2, равносильна функции квадратурного коэффициента взвешивания $\mu_1(\tau)$ с точностью до мощности $U_2^2/2$ сигнала $u_2(t)$, а с учётом замечания по технической реализации КА функционально соответствует изменениям напряжения $\nu_1(\tau)$ с коэффициентом пропорциональности, зависящим от схемотехнической реализации КА:

$$B_{12}(\tau) \Leftrightarrow \frac{U_2^2}{2} \mu_1(\tau); \quad B_{12}(\tau) \Rightarrow \nu_1(\tau). \quad (12)$$

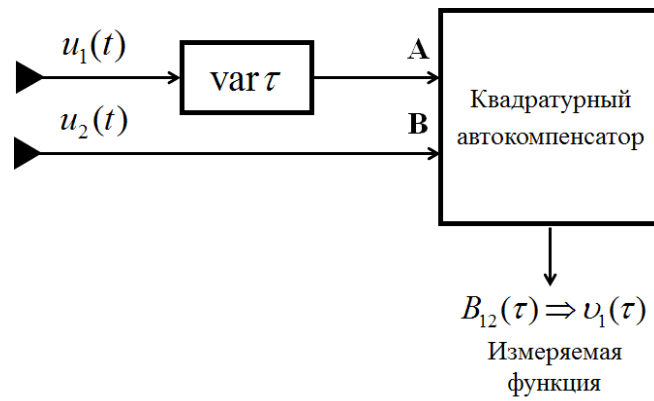


Рис. 2. Схема измерения корреляционной функции

Функциональная операция $\text{var } \tau$ на рис. 2 подразумевает изменение задержки сигнала $u_1(t)$ относительно сигнала $u_2(t)$ в процессе измерения, остальные операции аналогичны операциям на рис. 1.

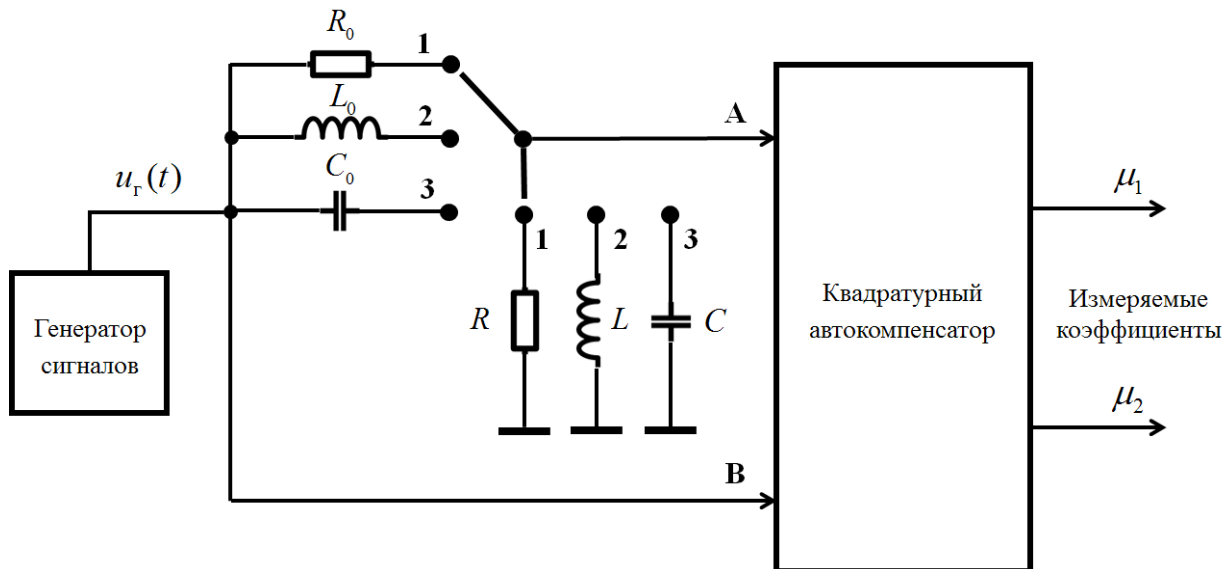
Более востребована в различных теоретических и практических приложениях нормированная корреляционная функция (коэффициент корреляции), которая равна

$$\rho_{12}(\tau) = \frac{B_{12}(\tau)}{B_{12}(\tau)_{\max}} = \cos(2\pi f\tau + \Delta\varphi_{12}), \quad (13)$$

при этом исключается зависимость результата от схемотехнической реализации КА.

4. Измерение активного сопротивления, индуктивности и ёмкости

Измерение указанных физических величин основано на возможности измерения посредством КА отношения амплитуд сигналов. Схема измерений показана на рис. 3.

Рис. 3. Схема измерений R, L, C

Для этого гармонический сигнал $u_{\Gamma}(t) = U_{\Gamma} \sin(2\pi ft + \varphi_{\Gamma})$ заданной частоты f с амплитудой U_{Γ} , сформированный отдельным генератором, подаётся на один вход КА непосредственно, а на другой – через делитель напряжения, образованный одноимёнными элементами: для измерения активного сопротивления – резисторами $R - R_0$, для измерения индуктивности

– индуктивными элементами $L - L_0$, для измерения ёмкости – конденсаторами $C - C_0$. Элементы R, L, C делителя напряжения являются измеряемыми, а элементы R_0, L_0, C_0 – вспомогательными, величины которых априорно известны.

При технической реализации КА следует обеспечивать условия:

$$R_{\text{вхА}}, R_{\text{вхВ}} \gg R; 2\pi fL_{\text{вхА}}, 2\pi fL_{\text{вхВ}} \gg 2\pi fL; \frac{1}{2\pi fC_{\text{вхА}}}, \frac{1}{2\pi fC_{\text{вхВ}}} \gg \frac{1}{2\pi fC}, \quad (14)$$

где $R_{\text{вхА}}, R_{\text{вхВ}}; L_{\text{вхА}}, L_{\text{вхВ}}; C_{\text{вхА}}, C_{\text{вхВ}}$ – активные, индуктивные и ёмкостные составляющие входных (входы **А** и **В**) сопротивлений КА.

В представленной на рис. 3 схеме отношение амплитуд сигналов на входах **А** и **В** КА при измерениях R, L, C с учётом зависимости (8) будет равно:

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{U_A}{U_T} = \frac{R}{R + R_0} = \frac{L}{L + L_0} = \frac{C_0}{C + C_0} = \sqrt{\mu_1^2 + \mu_2^2}, \quad (15)$$

откуда измеряемые R, L, C с учётом коэффициентов преобразования устройств перемножения сигналов КА рассчитываются по формулам:

$$R = \frac{R_0}{\frac{1}{\sqrt{k_1^2 v_1^2 + k_2^2 v_2^2}} - 1}; L = \frac{L_0}{\frac{1}{\sqrt{k_1^2 v_1^2 + k_2^2 v_2^2}} - 1}; C = C_0 \left(\frac{1}{\sqrt{k_1^2 v_1^2 + k_2^2 v_2^2}} - 1 \right). \quad (16)$$

5. Заключение

Показана возможность использования метода когерентной компенсации узкополосных помех с реализацией в виде квадратурного автокомпенсатора по новому назначению – для косвенных измерений трёх характеристик электрических сигналов – разности фаз, отношения амплитуд, корреляционной функции и трёх физических величин – активного сопротивления, индуктивности и ёмкости. Рассмотрена методическая база для осуществления таких измерений, которая необходима при технической реализации многофункционального измерительного прибора, позволяющего при разработке и эксплуатации различных радиоэлектронных систем, устройств и цепей снизить затраты на приобретение и техническое содержание соответствующих специализированных измерительных приборов.

Литература

1. Мирский Г. Я. Электронные измерения. М.: Радио и связь. 1986. 440 с.
2. Уидроу Б., Стирнз С. Адаптивная обработка сигналов / пер. с англ. под редакцией В. В. Шахгильдяна. М.: Радио и связь. 1989. 440 с.
3. Лосев Ю. И., Бердников А. Г., Гойхман Э. Ш., Сизов Б. Д. Адаптивная компенсация помех в каналах связи. М.: Радио и связь. 1988. 208 с.
4. Чмых М. К. Цифровая фазометрия. М.: Радио и связь. 1993. 184 с.
5. Жилинскас Р.-П. П. Измерители отношения и их применение в радиоизмерительной технике. М.: Сов. радио. 1975. 320 с.
6. Техническое описание измерителя L, C, R цифрового Е7-8 [Электронный ресурс] // URL: <https://www.qrz.ru/schemes/detail/11415.html> (дата обращения: 10.05.2022).

Статья поступила в редакцию 08.06.2022;
переработанный вариант – 03.08.2022.

Арсентьев Виктор Георгиевич

к.т.н., ведущий научный сотрудник научно-технического центра специализированных информационных систем СибГУТИ (630008, Новосибирск, ул. Бориса Богаткова, 51), тел. (383) 2-693-938, e-mail: viktor.arsentev.51@mail.ru.

Криволапов Геннадий Илларионович

к.т.н., доцент, заведующий лабораторией, руководитель научно-технического центра специализированных информационных систем СибГУТИ (630008, Новосибирск, ул. Бориса Богаткова, 51), тел. (383) 2-693-942, e-mail: krivolapov@sibsutis.ru.

On the compensation method in electronic measurements**Viktor G. Arsent'ev**

Candidate of technical sciences, Leading researcher, Siberian State University of Telecommunications and Information Science (SibSUTIS, Novosibirsk, Russia), viktor.arsentev.51@mail.ru.

Gennagy I. Krivolapov

Candidate of technical sciences, Head of laboratory, Siberian State University of Telecommunications and Information Science (SibSUTIS, Novosibirsk, Russia), krivolapov@sibsutis.ru.

The methodological basis of the coherent compensation method application of narrow-band interference for measuring the characteristics of electrical signals and physical quantities is considered.

Keywords: electronic measurements, quadrature autocompensator, multifunctional measuring device.

References

1. Mirskij G.YA. *Elektronnye izmereniya* [Electronic measurements]. Moscow: Radio and Communications, 1986, 440 p.
2. Uidrou B., Stirnz S. *Adaptivnaja obrabotka signalov. Per. s angl. pod red. V. V. Shahgil'djana* [Adaptive signal processing. Translation from English]. Moscow: Radio and Communication, 1989, 440 p.
3. Ju. I. Losev, A. G. Berdnikov, Je. Sh. Gojhman, B. D. Sizov *Adaptivnaja kompensacija pomeh v kanalah svjazi* [Adaptive interference compensation in communication channels]. Moscow: Radio and Communication, 1988, 208 p.
4. CHmyh M.K. *Cifrovaya fazometriya* [Digital phase measurement]. Moscow: Radio and Communications, 1993, 184 p.
5. ZHilinskas R.-P.P. *Izmeriteli otnosheniya i ih primenenie v radioizmeritel'noj tekhnike* [Attitude meters and their application in radio measuring equipment]. Moscow: Radio and Communications, 1975, 320 p.
6. *Tekhnicheskoe opisanie izmeritelya L, C, R cifrovogo E7-8* [Technical description of the digital meter L, C, R E7-8], available at: <https://www.qrz.ru/schemes/detail/11415.html> (accessed 10.05.2022).

Оценка допустимого углового разноса устройств для сценария диаграммообразования в сверхплотных сетях радиодоступа миллиметрового диапазона¹

И. В. Гришин, Г. А. Фокин

Данная работа посвящена оцениванию допустимого углового разноса между устройствами, работающими в сверхплотных сетях радиодоступа в миллиметровом диапазоне волн для последующего формирования антенной решеткой базовой станции трёхмерной диаграммы направленности с оптимальными характеристиками. Содержание настоящей работы можно разделить на две части. В первой части приводится математическая формализация оценки количества источников радиоизлучения и их угловых координат. На основе представленной математической модели и разработанной программы имитационного моделирования во второй части работы выполняется исследование и установление точностных характеристик углового разноса устройств в зависимости от помех в сценарии диаграммообразования сверхплотных сетей радиодоступа при использовании устройствами алгоритма комбинированного измерения азимута и угла места.

Ключевые слова: алгоритм множественной классификации сигналов, азимут, угол места, пространственный спектр сигнала, плоская эквидистантная антенная решетка, разнос угловых координат.

1. Введение

В настоящее время на территории Российской Федерации начинается развитие сетей мобильной связи пятого поколения (5G). Внедрение данной технологии согласно прогнозам специалистов сформирует 70 % от общего объема экономического эффекта от технологий беспроводной связи. Так, к 2024 году покрытие сетью 5G должно быть организовано в 10 городах Российской Федерации с количеством населения не менее 1 млн человек [1].

Для достижения установленных показателей развития беспроводной связи был разработан ряд технологических задач, в состав которых входит разработка аппаратных и программно-аппаратных решений для создания сети NG-RAN в составе активных многоэлементных антенных систем FD-MIMO [2, 3]. Данная задача, помимо прочего, включает в себя разработку алгоритмов адаптивного формирования трехмерной диаграммы направленности антенной системой [4], что позволит компенсировать высокие потери в тракте распространения, обеспечит надежное обнаружение и последующее отслеживание сигнала как на этапе начального установления соединения [5, 6], так и при ведении направленной радиосвязи [7, 8].

Для того, чтобы основной лепесток формируемой антенной решёткой (АР) базовой станции (БС) диаграммы направленности был направлен строго на абонентский терминал (АТ), станция должна располагать данными об угловых координатах данного терминала. Известные

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 22-29-00528), <https://rscf.ru/project/22-29-00528/>

алгоритмы ESPRIT и MUSIC [9, 10] демонстрируют свою высокую эффективность в обнаружении направления прихода сигнала и применимы для систем с антенными решётками любой конфигурации. В то же время на основе классических алгоритмов ESPRIT и MUSIC управление изменением направления основного лепестка диаграммы направленности антенны возможно только на плоскости. Для формирования трехмерной диаграммы направленности антенной системой требуется использование модификаций вышеперечисленных алгоритмов.

Целью данной работы является исследование и установление точностных характеристик углового разноса устройств в зависимости от помех в сценарии диаграммообразования сверхплотных сетей радиодоступа при использовании устройствами алгоритма комбинированного измерения азимута и угла места, в том числе анализ потенциальных характеристик алгоритма 2D-MUSIC, таких как: точность в определении количества источников радиоизлучения, точность оценки угловых координат и минимальный угловой разнос между устройствами, работающими в диапазоне частот FR2 (24250–52600 ГГц).

2. Модель распространения сигнала в системах MIMO

Рассматриваемый в данной статье частотный диапазон FR2 предполагает возможность интеграции антенн MIMO в АТ, и на данный момент времени уже имеются технические решения для диапазонов частот n257 (26.5–29.5 ГГц), n259 (39.5–43.5 ГГц), n260 (37–40 ГГц) и n261 (27.5–28.35 ГГц) [11–13].

Вычисление пространственных координат АТ базовой станцией возможно за счёт извлечения необходимой информации из параметров принимаемого станцией радиосигнала, который, как известно, в однородной среде распространяется прямолинейно и с постоянной скоростью $c \approx 3 \cdot 10^8$ м/с. Антенны БС и АТ представляют в данном случае плоские эквидистантные решётки, состоящие из N_{UT} элементов антенны передающей и N_{BS} элементов для антенны, принимающей радиосигнал. При этом для антенны БС $N_{BS} \gg 1$, что позволяет обнаруживать угол места θ , азимут φ поступления радиосигнала от АТ, а также обеспечивать формирование узкой диаграммы направленности как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскостях.

В настоящее время в сетях мобильной связи применяется технология многопользовательских систем MU-MIMO (multiuser MIMO), которая предусматривает одновременное взаимодействие БС с несколькими АТ, количество которых здесь обозначено как K . Тогда вектор сигнала $\dot{s}_T(t) = [\dot{s}_{T,1}(t) \ \dot{s}_{T,2}(t) \ \dots \ \dot{s}_{T,N_{UT}}(t)]^T$, излучаемого АР БС в режиме MU-MIMO, описывается комплексным вектором вида:

$$\dot{s}_T(t) = \sqrt{E_S} \dot{\mathbf{W}} \dot{\mathbf{s}}(t), \quad \dot{s}_T \in \mathbb{C}^{N_{BS} \times 1}, \quad (1)$$

где E_S – энергия, требуемая для передачи одного символа;

$\dot{\mathbf{s}}(t) = [\dot{s}_1(t) \ \dot{s}_2(t) \ \dots \ \dot{s}_K(t)]^T$, $\dot{\mathbf{s}} \in \mathbb{C}^{K \times 1}$ – вектор комплексных сигналов, излучаемых АТ.

$\dot{\mathbf{W}} = [\dot{\mathbf{w}}_1 \ \dot{\mathbf{w}}_2 \ \dots \ \dot{\mathbf{w}}_K] \in \mathbb{C}^{N_{BS} \times K}$ – матрица, состоящая из векторов комплексных весовых коэффициентов, формирующих диаграмму направленности АР для каждого из K направлений радиоизлучения. Вектор комплексных весовых коэффициентов, необходимых для формирования диаграммы направленности в направлении $k=1 \dots K$, определяется согласно выражению:

$$\dot{\mathbf{w}}_k = K^{-1/2} \dot{\mathbf{a}}_{BS,k}(\Theta_{T,k}), \quad 1 \leq k \leq K, \quad (2)$$

где $\dot{\mathbf{a}}_{BS,k}(\Theta_{T,k}) \in \mathbb{C}^{N_{BS} \times 1}$ – вектор откликов элементов АР БС, излучающей в направлении k -го АТ;

$\Theta_{T,k} = (\theta_{T,k}, \varphi_{T,k})$ – угловые координаты выхода сигнала в направлении k -го АТ;

$\varphi_{T,k}$ – угол ориентации k -го луча в горизонтальной плоскости относительно нормали апертуры плоской АР (азимут);

$\theta_{T,k}$ – угол ориентации k -го луча в вертикальной плоскости относительно нормали апертуры плоской АР (угол места).

В первом приближении можно считать, что количество элементов АР для всех АТ составляет N_{UT} . Тогда принимаемый АР БС сигнал может быть представлен выражением следующего вида:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{s}}_R(t) &= \sum_{k=1}^K \dot{\mathbf{v}}_k^H \left(\sum_{m=1}^{M_k} \dot{\mathbf{h}}_{k,m} \dot{\mathbf{s}}_k(t - \tau_{k,m}) + \dot{\mathbf{n}}_k(t) \right) = \\ &= \sum_{k=1}^K \left(\dot{\mathbf{v}}_k^H \dot{\mathbf{h}}_{k,1} \dot{\mathbf{s}}_k(t - \tau_{k,1}) + \sum_{m'=2}^{M_k} \dot{\mathbf{v}}_k^H \dot{\mathbf{h}}_{k,m'} \dot{\mathbf{s}}_k(t - \tau_{k,m'}) + \dot{\mathbf{v}}_k^H \dot{\mathbf{n}}_k(t) \right),\end{aligned}\quad (3)$$

где M_k – количество составляющих сигнала, поступающего на БС от k -го АТ;

$m = 1$ – компонента принимаемого сигнала для условия прямой видимости (LOS);

$m > 1$ – компоненты многолучевого распространения при условии отсутствия прямой видимости (NLOS);

$\dot{\mathbf{v}}_k \in \mathbb{C}^{N_{BS} \times 1}$ – вектор комплексных весовых коэффициентов устройства обработки сигналов на приёмной стороне БС;

$\dot{\mathbf{h}}_{k,m} \approx \dot{h}_{k,m} \sqrt{N_{BS} N_{UT}} \dot{\mathbf{a}}_R(\Theta_{R,k,m}) \dot{\mathbf{a}}_T^H(\Phi_{T,k,m}) \in \mathbb{C}^{N_{BS} \times N_{UT}}$ – матрица канала для m -й составляющей сигнала, поступающего от k -го АТ, в том случае, если количество составляющих сигнала для k -го АТ (в случае, если компонента отсутствует, $\dot{\mathbf{h}}_{k,m}$ является нулевой);

$\Phi_{T,k,m} = (\theta_{T,k,m}^{UT}, \varphi_{T,k,m}^{UT})$ – угловые координаты, соответствующие m -й составляющей сигнала, излучаемого АР k -го АТ;

$\Theta_{R,k,m} = (\theta_{R,k,m}^{BS}, \varphi_{R,k,m}^{BS})$ – угловые координаты прихода на АР БС m -й составляющей сигнала k -го АТ;

$\dot{h}_{k,m}$ – комплексный отклик канала на m -ю составляющую сигнала от k -го АТ;

$\tau_{k,m}$ – время задержки m -й компоненты сигнала, передаваемого k -м АТ;

$[]^H$ – символ эрмитова сопряжения;

$\dot{\mathbf{n}}(t) \in \mathbb{C}^{N_{BS} \times 1}$ – вектор комплексной шумовой составляющей.

Векторы комплексных откликов элементов АР БС и АТ на сигнал в случае передачи и приема $\dot{\mathbf{a}}_{BS}(\Theta)$, $\dot{\mathbf{a}}_{UT}(\Phi)$ определяются согласно выражению:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{a}}_{BS}(\Theta_{ind}) &= N_{BS}^{-1/2} \exp\left(-j \mathbf{x}_{BS}^T \boldsymbol{\beta}(\theta_{ind}^{BS}, \varphi_{ind}^{BS})\right) \\ \dot{\mathbf{a}}_{UT}(\Phi_{ind}) &= N_{UT}^{-1/2} \exp\left(-j \mathbf{x}_{UT}^T \boldsymbol{\beta}(\theta_{ind}^{UT}, \varphi_{ind}^{UT})\right),\end{aligned}\quad (4)$$

где $\boldsymbol{\beta}(\theta_{ind}^{IND}, \varphi_{ind}^{IND}) = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \left[\sin(\theta_{ind}^{IND}) \cos(\varphi_{ind}^{IND}), \sin(\theta_{ind}^{IND}) \sin(\varphi_{ind}^{IND}), \cos(\theta_{ind}^{IND}) \right]^T$ – векторное волновое число;

$\mathbf{x}_{IND} = [\mathbf{x}_{IND,1} \ \mathbf{x}_{IND,2} \ \dots \ \mathbf{x}_{IND,N_{IND}}]$ – матрица декартовых координат элементов АР БС

или АТ ($\mathbf{x}_{IND,n} = [x_{IND,n}, y_{IND,n}, z_{IND,n}]^T$, $n \in 1 \dots N_{IND}$);

IND – индекс, определяющий принадлежность к базовой станции BS или терминалу UT ;

ind соответствует нижним индексам в (2), а также в выражении, описывающем $\dot{\mathbf{h}}_{k,m}$.

В выражении (3) второе слагаемое, представленное суммой по m' , определяет интерференцию в восходящем канале. Соотношение сигнал/(шум+интерференция) для выражения (3) может быть определено как:

$$SINR_k = \frac{E_{S,k} \left| E \left[\dot{\mathbf{v}}_k^H \dot{\mathbf{h}}_{k,1} \right] \right|^2}{\sum_{k=1}^K \sum_{m'=2}^M E_{S,k} \left[\left| \dot{\mathbf{v}}_k^H \dot{\mathbf{h}}_{k,m'} \right|^2 \right] + \sigma^2 E \left[\left\| \dot{\mathbf{v}}_k \right\|^2 \right]}. \quad (5)$$

Приведенные в работе [14] результаты исследований показали, что в сценариях многолучевого распространения радиоволн миллиметрового диапазона максимальное количество компонент многолучевого распространения (КМП) равно 4. Данный факт позволяет при моделировании многолучевого распространения сигналов в диапазоне частот 28 ГГц использовать распределение Пуассона с математическим ожиданием 1.8 [15].

Для оценки значений составляющих принимаемого сигнала может быть использована частная модель распространения радиосигналов в условиях городских микросот с радиусом не более 200 м (UMi) для высот подвесов антенн БС $h_{BS} = 10$ м и АТ $1.5 \text{ м} \leq h_{UT} \leq 22.5$ м (рис. 1), которая представлена в техническом отчёте 3GPP TR 38.901 [16].

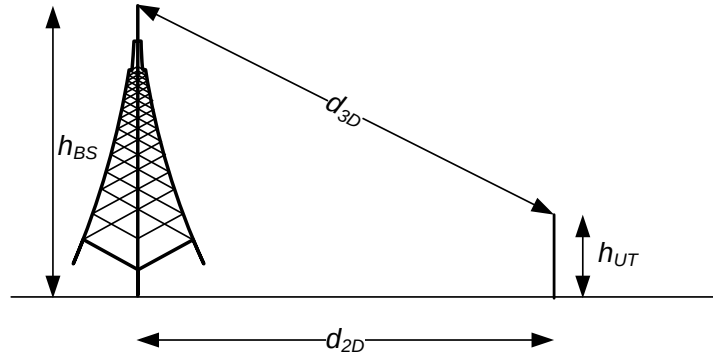


Рис. 1. Модель распространения сигнала

Потери на трассе в условиях прямой видимости LOS определяются согласно выражению:

$$PL_{UMi-LOS} = \begin{cases} 32.4 + 21 \log_{10}(d_{3D}) + 20 \log_{10}(f_c) & 10 \text{ м} \leq d_{2D} \leq d'_{BP} \\ 32.4 + 40 \log_{10}(d_{3D}) + 20 \log_{10}(f_c) - \\ - 9.5 \log_{10}((d'_{BP})^2 + (h_{BS} - h_{UT})^2) & d'_{BP} \leq d_{2D} \leq 5 \text{ км} \end{cases} \quad (6)$$

В условиях отсутствия прямой видимости NLOS потери на трассе определяются как:

$$PL_{UMi-NLOS} = \max(PL_{UMi-LOS}, PL'_{UMi-NLOS}) \text{ для } 10 \text{ м} \leq d_{2D} \leq 5 \text{ км}, \quad (7)$$

где $PL'_{UMi-NLOS} = 35.3 \log_{10}(d_{3D}) + 22.4 + 21.3 \log_{10}(f_c) - 0.3(h_{UT} - 1.5)$;

d'_{BP} – расстояние до точки прерывания, м, определяемое согласно выражению:

$$d'_{BP} = 4\lambda^{-1}(h_{BS} - h_E)(h_{UT} - h_E),$$

где h_E – усреднённая высота местности в зоне приёма, м;

λ – длина волны центральной частоты узкополосного сигнала, м.

Зависимости потерь распространения сигнала от расстояния для условий LOS и NLOS на частоте 28 ГГц (диапазоны частот n257, n261) для разных значений высот подвеса антенн АТ и $h_E = 1$ м представлены на рис. 2.

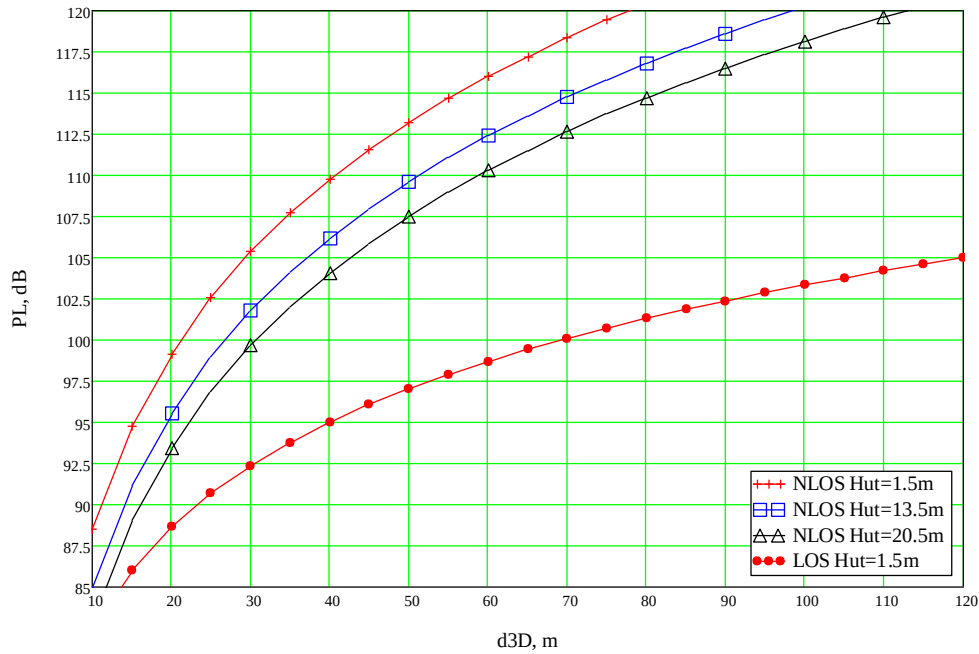


Рис.2. Зависимость потерь распространения сигнала от расстояния

Согласно спецификации 3GPP TS38.101-2 [17] для диапазонов частот n257, n258, n260, n261 максимальное значение эквивалентной изотропно-излучаемой мощности для устройств 3-го класса составляет $EIRP=43$ дБм, а чувствительность приёмника находится выше уровня $p_{RS} \geq -88.3$ дБм. Как видно из рис. 2, радиус соты для сетей, работающих в данных диапазонах частот, должен быть ограничен несколькими десятками метров. Для UDN рассматривается возможность размещения БС на столбах уличного освещения, что приводит к формированию пикосот. Для пикосот с учётом [14] вполне вероятны сценарии, когда передача сигналов осуществляется в условиях прямой видимости и отсутствуют компоненты многолучевого распространения. Далее в статье рассматривается именно такой сценарий.

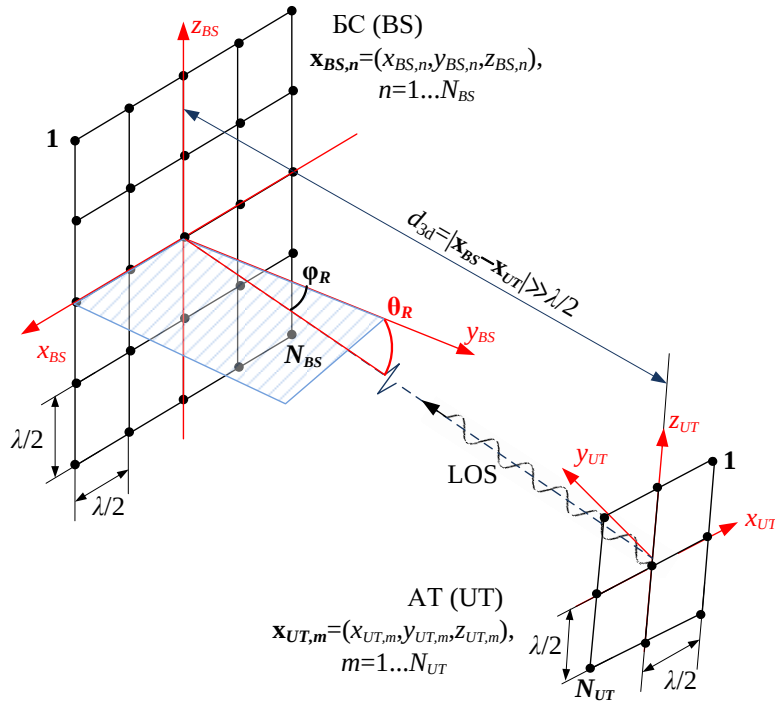


Рис. 3. Трёхмерная модель распространения сигнала для условия прямой видимости

Трёхмерная модель распространения сигнала в системах MIMO, описываемая выражениями (1–4), представлена на рис. 3.

Для частоты 28 ГГц длина волны равна $\lambda = 0.011$ м, поэтому фронт волны в окрестностях приёмной антенны может считаться плоским.

Задача, которая ставится в данном случае перед БС, заключается в определении количества источников радиоизлучения (ИРИ) и последующем нахождении их угловых координат с целью формирования оптимальной диаграммы направленности АР. При этом необходимо учитывать вероятность того, что угловое расстояние между ИРИ в ряде случаев может быть достаточно малым (меньше ширины диаграммы направленности АР).

Для решения данной задачи были разработаны проекционные алгоритмы, в частности, алгоритм множественной классификации сигналов MUSIC и его последующая модификация 2D-MUSIC, которая позволяет вычислять не только азимут, но и угол места ИРИ.

Принцип работы алгоритма базируется на ортогональности подпространств сигналов и шумов. Согласно алгоритму MUSIC должна быть найдена ковариационная матрица принимаемого сигнала (3) $\dot{\mathbf{R}}_R$ с учётом допущений об отсутствии компонент многолучевого распространения:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{R}}_R &= E \left[\sum_{k=1}^K \left(\dot{\mathbf{h}}_{k,1} \dot{s}_k(t - \tau_{k,1}) + \dot{\mathbf{n}}_k(t) \right) \left(\sum_{k=1}^K \left(\dot{\mathbf{h}}_{k,1} \dot{s}_k(t - \tau_{k,1}) + \dot{\mathbf{n}}_k(t) \right) \right)^H \right] = \\ &= \dot{\mathbf{H}} E \left[\dot{\mathbf{s}}_\Sigma, \dot{\mathbf{s}}_\Sigma^H \right] \dot{\mathbf{H}}^H + E \left[\dot{\mathbf{n}}, \dot{\mathbf{n}}^H \right] = \dot{\mathbf{H}} \dot{\mathbf{R}}_T \dot{\mathbf{H}}^H + \sigma^2 \mathbf{I}_{N_{BS}} = \dot{\mathbf{U}} \mathbf{\Lambda} \dot{\mathbf{U}}^H \end{aligned} \quad (8)$$

где $\dot{\mathbf{R}}_T$ – ковариационная матрица передаваемого сигнала;

$\mathbf{I}_{N_{BS}}$ – единичная матрица размерности N_{BS} ;

σ^2 – дисперсия шумовой составляющей;

$\dot{\mathbf{U}} \mathbf{\Lambda} \dot{\mathbf{U}}^H$ – спектральное разложение ковариационной матрицы $\dot{\mathbf{R}}_R$;

$\dot{\mathbf{U}} = [\dot{\mathbf{u}}_1, \dot{\mathbf{u}}_2, \dots, \dot{\mathbf{u}}_{N_{BS}}]$ – эрмитова положительно полуопределенная матрица собственных векторов матрицы $\dot{\mathbf{R}}_R$;

$\mathbf{\Lambda} = \text{diag} \{ \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{N_{BS}} \}$ – диагональная матрица положительных собственных значений матрицы $\dot{\mathbf{R}}_R$.

При спектральном разложении ковариационной матрицы полного ранга $\dot{\mathbf{R}}_R$ (8) элементы матрицы собственных значений матрицы $\mathbf{\Lambda}$ могут быть представлены в виде:

$$\lambda_n = \begin{cases} \lambda_{S,n} + \sigma^2, n = 1 \dots K \\ \sigma^2, n = K + 1, \dots N_{BS} \end{cases}, \quad (9)$$

где $\lambda_{S,n}$ – n -е собственное значение произведения матриц $\dot{\mathbf{H}} \dot{\mathbf{R}}_T \dot{\mathbf{H}}^H$.

Как видно из (9), величина дисперсии шумов в каналах решетки позволяет задать пороговое значение, согласно которому количество собственных значений в матрице $\mathbf{\Lambda}$, превышающих σ^2 : $\lambda_{nop} \geq \sigma^2$, определяет возможное количество источников сигналов $\hat{K}$: $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_{\hat{K}} \geq \lambda_{nop}$ [9, 10]. В таком случае спектральное разложение матрицы $\dot{\mathbf{R}}_R$ может быть представлено суммой сигнальной и шумовой составляющих:

$$\dot{\mathbf{U}} \mathbf{\Lambda} \dot{\mathbf{U}}^H = \dot{\mathbf{U}}_S \mathbf{\Lambda}_S \dot{\mathbf{U}}_S^H + \dot{\mathbf{U}}_n \mathbf{\Lambda}_n \dot{\mathbf{U}}_n^H = \dot{\mathbf{U}}_S \mathbf{\Lambda}_S \dot{\mathbf{U}}_S^H + \sigma^2 \dot{\mathbf{U}}_n \mathbf{I}_{(N_{BS} - \hat{K})} \dot{\mathbf{U}}_n^H, \quad (10)$$

где $\dot{\mathbf{U}}_S = [\dot{\mathbf{u}}_1, \dot{\mathbf{u}}_2, \dots, \dot{\mathbf{u}}_{\hat{K}}]$ – матрица первых $\hat{K}$ собственных векторов $\dot{\mathbf{R}}_R$;

$\Lambda_S = \text{diag} \{ \lambda_{S,1}, \lambda_{S,2}, \dots, \lambda_{S,\hat{K}} \}$ – матрица первых $\hat{K}$ собственных значений $\dot{\mathbf{R}}_R$;

$\dot{\mathbf{U}}_n = [\dot{\mathbf{u}}_{\hat{K}+1}, \dot{\mathbf{u}}_{\hat{K}+2}, \dots, \dot{\mathbf{u}}_{N_{BS}}]$ – матрица последних $N_{BS} - \hat{K}$ собственных векторов $\dot{\mathbf{R}}_R$;

$\Lambda_n = \text{diag} \{ \lambda_{\hat{K}+1}, \lambda_{\hat{K}+2}, \dots, \lambda_{N_{BS}} \}$ – матрица последних $N_{BS} - \hat{K}$ собственных значений $\dot{\mathbf{R}}_R$.

Система векторов $\dot{\mathbf{U}}_R = [\dot{\mathbf{U}}_S, \dot{\mathbf{U}}_n]$ образует ортонормированный базис в пространстве размерности N_{BS} , которое согласно (8–10) может быть представлено сигнальным $\hat{K}$ -мерным подпространством и его $(N_{BS} - \hat{K})$ -мерным ортогональным дополнением, являющимся подпространством шумов. Операторы проекции на подпространство сигналов и подпространство шумов имеют вид:

$$\dot{\mathbf{W}}_S = \dot{\mathbf{U}}_S \dot{\mathbf{U}}_S^H = \dot{\mathbf{H}} (\dot{\mathbf{H}}^H \dot{\mathbf{H}})^{-1} \dot{\mathbf{H}}^H. \quad (11)$$

$$\dot{\mathbf{W}}_n = \dot{\mathbf{W}}_S^\perp = \dot{\mathbf{U}}_n \dot{\mathbf{U}}_n^H = \mathbf{I} - \dot{\mathbf{H}} (\dot{\mathbf{H}}^H \dot{\mathbf{H}})^{-1} \dot{\mathbf{H}}^H. \quad (12)$$

Векторы отклика элементов АР являются ортогональными подпространству шума, что позволяет определить угол места и азимут ИРИ путём нахождения максимумов функции пространственного спектра:

$$f(\hat{\theta}_R^{BS}, \hat{\phi}_R^{BS}) = \frac{\hat{\mathbf{a}}_{BS}^H(\hat{\theta}_R^{BS}, \hat{\phi}_R^{BS}) \hat{\mathbf{a}}_{BS}(\hat{\theta}_R^{BS}, \hat{\phi}_R^{BS})}{\hat{\mathbf{a}}_{BS}^H(\hat{\theta}_R^{BS}, \hat{\phi}_R^{BS}) \dot{\mathbf{U}}_n \dot{\mathbf{U}}_n^H \hat{\mathbf{a}}_{BS}(\hat{\theta}_R^{BS}, \hat{\phi}_R^{BS})}, \quad (13)$$

где $\hat{\theta}_R^{BS}, \hat{\phi}_R^{BS}$ – оценки углов места и азимута,

$\hat{\mathbf{a}}_{BS}(\hat{\theta}_R^{BS}, \hat{\phi}_R^{BS})$ – оценка вектора отклика элементов плоской эквидистантной АР.

Следует в то же время отметить высокую сложность алгоритма 2D-MUSIC, которая оценивается как [18]:

$$O \left\{ LN_{UT}^2 N_{BS}^2 + N_{UT}^3 N_{BS}^3 + n^2 \left(N_{UT} N_{BS} (N_{UT} N_{BS} - K + 1) - K \right) \right\}.$$

В качестве ещё одного недостатка алгоритма следует отметить снижение стабильности его работы в случае наличия корреляционных связей между принимаемыми сигналами.

3. Численные результаты и их интерпретация

С целью определения точностных характеристик и разрешающей способности алгоритма 2D-MUSIC был проведен ряд вычислительных экспериментов с помощью разработанной программы имитационного моделирования при различных значениях уровня шума, количества элементов плоской эквидистантной АР и углового разнеса абонентских терминалов. Измерения проводились для АР с расстоянием между элементами, равным половине длины волны принимаемого сигнала: 0.5λ (для $f_c = 28$ ГГц).

Отдельные результаты измерений, полученные в ходе проведения экспериментов, на основе которых можно сделать вывод о точностных характеристиках и разрешающей способности алгоритма в целом, приведены в сводных таблицах. При помощи разработанной программы были получены трёхмерные изображения пространственных спектров и рисунки их

изолиний (рис. 4–9). На представленных рисунках изолиний красными цветом обозначены исходные значения углов положения и азимута для источников сигнала.

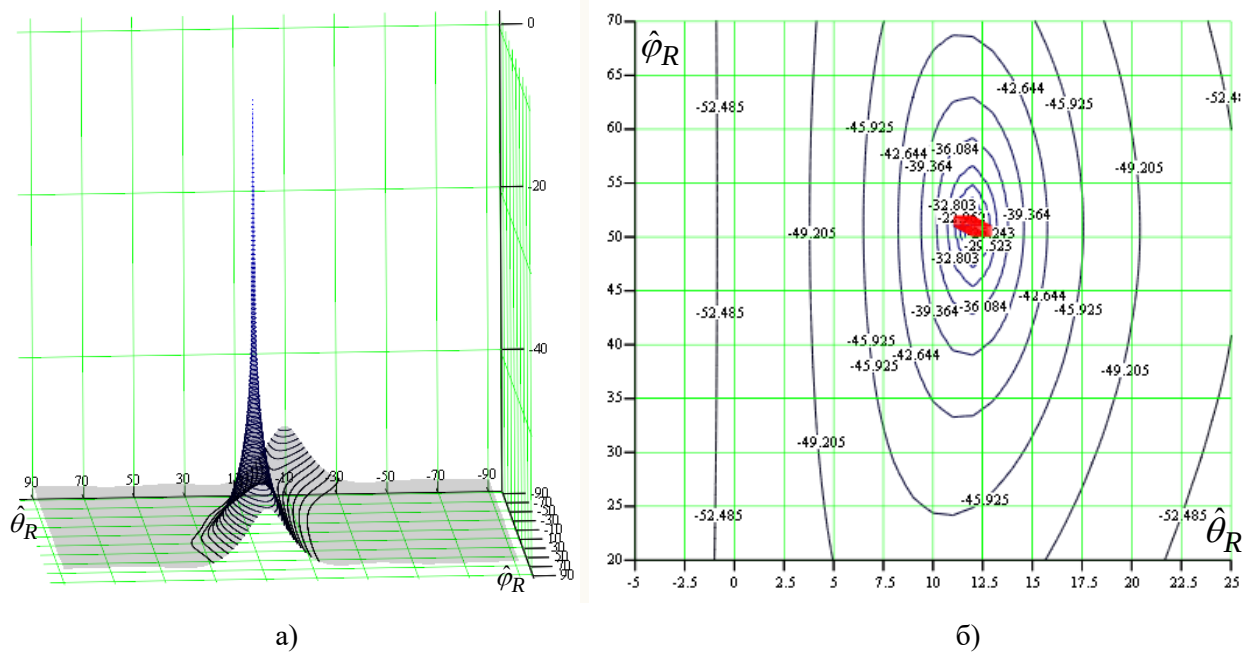


Рис. 4. а) нормированный пространственный спектр 2D-MUSIC;

б) изолинии спектра в области рассчитанных угловых координат ИРИ $N_{BS} = 16$; $\text{SINR} = 10$ дБ

Таблица 1. Оценки углов места и азимута (один ИРИ) $\theta_R^{BS} = 12.00^\circ$; $\phi_R^{BS} = 51.00^\circ$

N_{BS}	№	SINR							
		20, дБ		10, дБ		5, дБ		0, дБ	
		$\hat{\theta}_R^{BS}$	$\hat{\phi}_R^{BS}$	$\hat{\theta}_R^{BS}$	$\hat{\phi}_R^{BS}$	$\hat{\theta}_R^{BS}$	$\hat{\phi}_R^{BS}$	$\hat{\theta}_R^{BS}$	$\hat{\phi}_R^{BS}$
4	1	12°	51°	12°	50	12°	48°	12°	53°
	2	12°	51°	12°	51	12°	49°	13°	49°
	3	12°	51°	12°	52	11°	52°	13°	52°
	4	12°	51°	12°	50	11°	49°	12°	48°
	5	12°	51°	12°	50	12°	52°	12°	51°
итого		$\theta_R^{BS} \pm 0^\circ$	$\phi_R^{BS} \pm 0^\circ$	$\theta_R^{BS} \pm 0^\circ$	$\phi_R^{BS} \pm 1^\circ$	$\theta_R^{BS} \pm 1^\circ$	$\phi_R^{BS} \pm 3^\circ$	$\theta_R^{BS} \pm 1^\circ$	$\phi_R^{BS} \pm 4^\circ$
16	1	12°	51°	12°	51°	12°	52°	12°	51°
	2	12°	51°	12°	51°	12°	51°	12°	51°
	3	12°	51°	12°	51°	12°	51°	12°	50°
	4	12°	51°	12°	51°	12°	50°	12°	52°
	5	12°	51°	12°	51°	12°	51°	12°	52°
итого		$\theta_R^{BS} \pm 0^\circ$	$\phi_R^{BS} \pm 0^\circ$	$\theta_R^{BS} \pm 0^\circ$	$\phi_R^{BS} \pm 0^\circ$	$\theta_R^{BS} \pm 0^\circ$	$\phi_R^{BS} \pm 1^\circ$	$\theta_R^{BS} \pm 0^\circ$	$\phi_R^{BS} \pm 1^\circ$
64	1	12°	51°	12°	51°	12°	51°	12°	51°
	2	12°	51°	12°	51°	12°	51°	12°	51°
	3	12°	51°	12°	51°	12°	51°	12°	51°
	4	12°	51°	12°	51°	12°	51°	12°	51°
	5	12°	51°	12°	51°	12°	51°	12°	51°
итого		$\theta_R^{BS} \pm 0^\circ$	$\phi_R^{BS} \pm 0^\circ$	$\theta_R^{BS} \pm 0^\circ$	$\phi_R^{BS} \pm 0^\circ$	$\theta_R^{BS} \pm 0^\circ$	$\phi_R^{BS} \pm 0^\circ$	$\theta_R^{BS} \pm 0^\circ$	$\phi_R^{BS} \pm 0^\circ$

Результаты измерений для одного ИРИ показали (табл. 1), что алгоритм 2D-MUSIC обеспечивает нулевую погрешность при вычислении угловых координат ИРИ в случае применения антенной системы с решёткой, состоящей более чем из 16 элементов, для значений $\text{SINR} \leq 5$ дБ. Антенная система с решёткой из 16 элементов для заданных значений SINR (5) определяет

угловые координаты с погрешностью $\pm 1^\circ$, что для городских микросот (UMi) может считаться приемлемым показателем [19]. Последующее уменьшение количества элементов в антенной решётке базовой станции ведет к снижению точностных характеристик, что делает невозможным применение ряда сценариев позиционирования в сетях пятого поколения.

В работах [20–22], посвященных исследованию потенциальных возможностей проекционных методов, указывается, что данные методы позволяют многократно преодолеть предел разрешающей способности Рэлея, при котором наблюдается провал между пиками пространственного спектра, равный или больший 2 дБ [23]. Так, в работе [22] утверждается, что минимальное угловое расстояние для двух равномошных ИРИ ($P_1 = P_2 = P$), при котором обеспечивается разрешение сигналов AP, описывается выражением:

$$\Delta u = 8.71 \left(N_{BS}^5 P \right)^{-0.25}. \quad (14)$$

Для определения потенциальных возможностей алгоритма 2D-MUSIC рассматривались случаи разнеса на 1° , 2° , 3° и более градусов по азимуту и углу места для двух равномошных и неравномошных ИРИ. Количество источников радиоизлучения автоматически определяется количеством собственных значений ковариационной матрицы, превышающих заданное пороговое значение $\lambda_{пор}$ [9, 10]. Результаты отдельных экспериментов представлены в виде рисунков пространственных спектров и изолиний их фрагментов, а также сведены в таблицы.

Таблица 2. Оценки углов места и азимута (два ИРИ), дБ:

$$\theta_{R,1}^{BS} = 52^\circ; \varphi_{R,1}^{BS} = 54^\circ; \theta_{R,2}^{BS} = 49^\circ; \varphi_{R,2}^{BS} = 55^\circ$$

N_{BS}	SINR, дБ	λ_1	λ_2	σ^2	$\hat{\theta}_1$	$\hat{\varphi}_1$	$\hat{\theta}_2$	$\hat{\varphi}_2$
равномошные ИРИ: $P_1 = P_2$								
16	20	0.575	$2.809 \cdot 10^{-3}$	$1.670 \cdot 10^{-3}$	54°	54°	46°	55°
	10	0.575	—	0.019	50°	54°	—	—
64	30	2.414	0.044	$7.370 \cdot 10^{-5}$	53°	54°	47°	55°
	20	2.415	0.044	$4.213 \cdot 10^{-4}$	53°	54°	47°	55°
	10	2.415	0.045	$4.708 \cdot 10^{-3}$	53°	54°	47°	55°
256	30	11.575	0.585	$1.210 \cdot 10^{-5}$	53°	54°	48°	55°
	20	11.580	0.584	$4.248 \cdot 10^{-4}$	53°	54°	48°	55°
	10	11.570	0.589	$2.322 \cdot 10^{-3}$	53°	54°	48°	55°
неравномошные ИРИ: $P_1 = 0.5 P_2$								
16	20	0.710	—	$1.710 \cdot 10^{-3}$	—	—	47°	55°
	10	0.711	—	0.036	—	—	47°	55°
64	30	2.929	0.018	$7.554 \cdot 10^{-6}$	53°	54°	47°	55°
	20	2.930	0.018	$7.511 \cdot 10^{-4}$	53°	54°	47°	55°
	10	2.936	0.019	$9.803 \cdot 10^{-3}$	53°	54°	47°	55°
256	30	13.166	0.252	$1.211 \cdot 10^{-5}$	53°	54°	48°	55°
	20	13.167	0.252	$1.929 \cdot 10^{-4}$	53°	54°	48°	55°
	10	13.164	0.254	$2.558 \cdot 10^{-3}$	53°	54°	48°	55°
неравномошные ИРИ: $P_1 = 0.25 P_2$								
16	20	1.143	—	$4.608 \cdot 10^{-3}$	—	—	47°	55°
	10	0.711	—	0.036	—	—	47°	55°
64	30	4.644	$5.757 \cdot 10^{-3}$	$4.758 \cdot 10^{-5}$	53°	54°	47°	55°
	20	4.644	$5.904 \cdot 10^{-3}$	$1.224 \cdot 10^{-3}$	53°	54°	47°	55°
	10	4.646	—	0.011	—	—	47°	55°
256	30	19.675	0.086	$1.211 \cdot 10^{-5}$	53°	54°	48°	55°
	20	19.678	0.086	$2.968 \cdot 10^{-4}$	53°	54°	48°	55°
	10	19.664	0.088	$2.688 \cdot 10^{-3}$	52°	54°	48°	55°

Как показали приведенные результаты экспериментов, для шага перебора оценок угловых координат 1° разрешающая способность алгоритма 2D-MUSIC по азимуту и углу места составляет 3° , что в целом совпадает с (14) за исключением случая ($N_{BS} = 16$, SINR = 20 дБ),

когда удалось различить сигналы равномошных ИРИ, разнесённых друг относительно друга на угловое расстояние, меньшее, чем указано в выражении (14).

Как видно из табл. 2, вне зависимости от значений SINR и количества элементов АР погрешности в оценке угла места в среднем составили $\Delta\theta = \pm 1^\circ$.

При меньших угловых разнесах ИРИ шаг в 1° между соседними значениями оценок азимута и угла места не обеспечивает разрешение источников даже для АР с количеством элементов $N_{BS} = 256$ и значениях $\text{SINR} \geq 30$ дБ (рис. 5, табл.3).

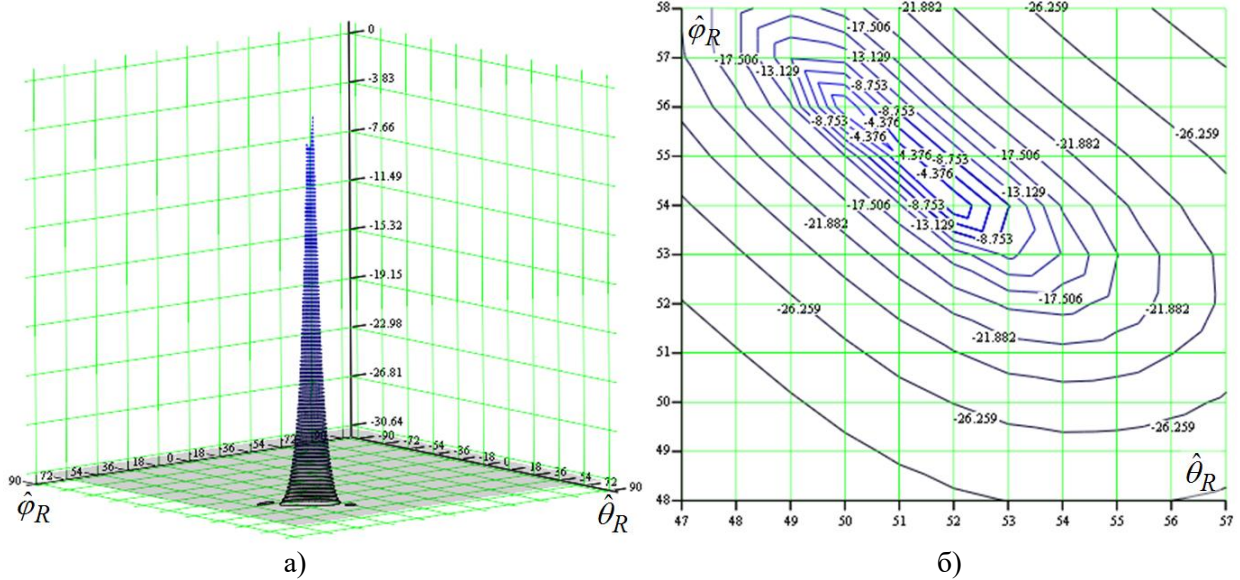


Рис. 5. а) пространственный спектр; б) изолинии спектра в области рассчитанных угловых координат

ИРИ $N_{BS} = 256$; $\text{SINR} = 30$ дБ; $\theta_{R,1}^{BS} = 52^\circ$; $\phi_{R,1}^{BS} = 54^\circ$; $\theta_{R,2}^{BS} = 50^\circ$; $\phi_{R,2}^{BS} = 56^\circ$

Таблица 3. Значения пространственного спектра, дБ, в области угловых координат равномошных ИРИ: $\theta_{R,1}^{BS} = 52^\circ$; $\phi_{R,1}^{BS} = 54^\circ$; $\theta_{R,2}^{BS} = 50^\circ$; $\phi_{R,2}^{BS} = 56^\circ$; $\text{SINR} = 30$ дБ; $N_{BS} = 256$, шаг 1°

$\lambda_1 = 36.319, \lambda_2 = 0.041$ $\lambda_3 = 1.495 \cdot 10^{-5}$		$\hat{\phi}_R^{BS}$					
		53°	54°	55°	56°	57°	58°
$\hat{\theta}_R^{BS}$	47°	-24.72	-23.56	-22.12	-20.49	-19.03	-18.56
	48°	-23.5	-21.92	-19.88	-17.32	-14.9	-15.04
	49°	-21.92	-19.76	-16.74	-12.22	-8.2	-12.9
	50°	-19.83	-16.74	-11.74	0	-8.38	-15.23
	51°	-16.98	-11.94	-0.59	-7.74	-14.64	-18.41
	52°	-12.95	-1.62	-7.42	-14.65	-18.39	-20.87
	53°	-9.07	-7.26	-14.28	-18.29	-20.86	-22.68
	54°	-11.98	-14.27	-17.99	-20.7	-22.62	-24.03

Также возможны ошибки в оценке количества источников радиоизлучения (табл. 3). Однако последующие расчёты (13) в области максимума пика пространственного спектра с шагом перебора 0.25° показали, что алгоритм 2D-MUSIC может обеспечить разрешающую способность в 2° по азимуту и углу места.

Результаты моделирования для случая перебора с шагом 0.25° равномошных источников и АР с количеством элементов $N_{BS} = 256$ приведены на рис. 6, 7 и в табл. 4. Выделенные в табл. 4 ячейки значений пространственного спектра показывают, что для АР с количеством элементов $N_{BS} = 256$ разрешение обеспечивается для значений $\text{SINR} > 10$ дБ.

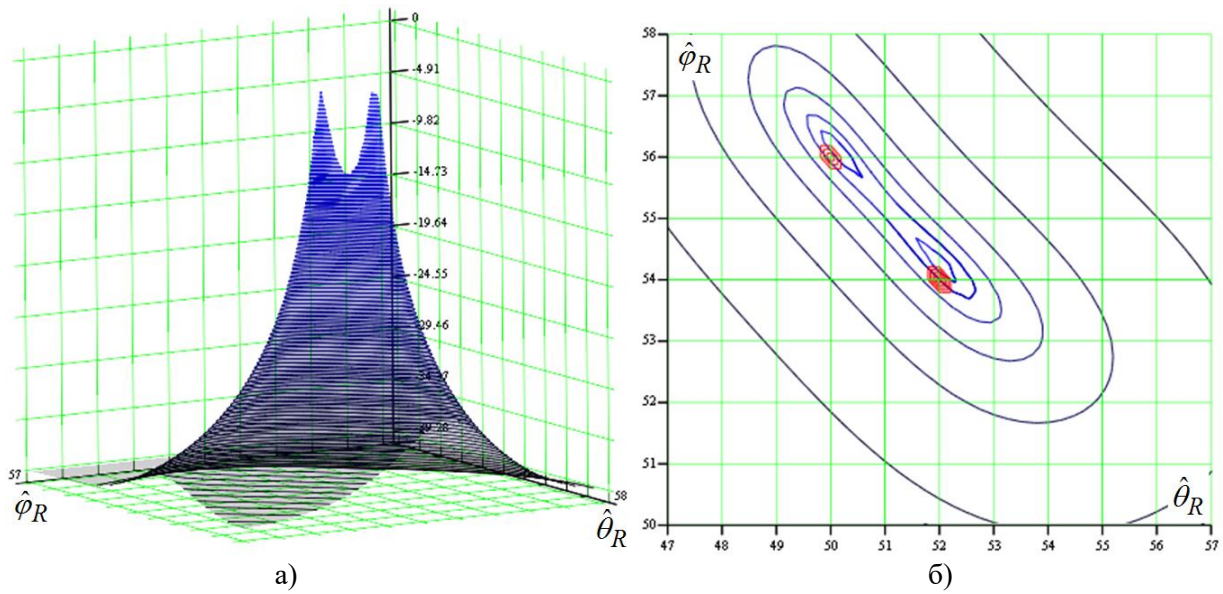


Рис. 6. а) фрагмент пространственного спектра $N_{BS} = 256$; $SINR = 20$ дБ;
 б) изолинии спектра в области рассчитанных угловых координат ИРИ

$$\theta_{R,1}^{BS} = 52^\circ; \varphi_{R,1}^{BS} = 54^\circ; \theta_{R,2}^{BS} = 50^\circ; \varphi_{R,2}^{BS} = 56^\circ$$

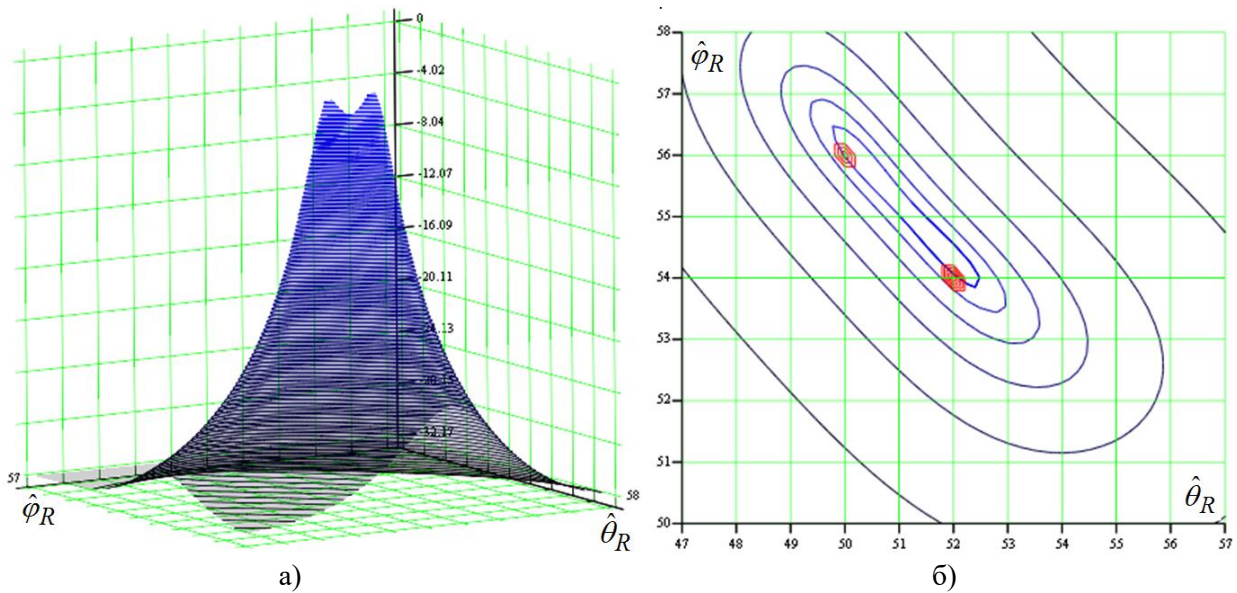


Рис. 7. а) фрагмент пространственного спектра $N_{BS}=256$; $SINR=10$ дБ;
 б) изолинии спектра в области рассчитанных угловых координат ИРИ

$$\theta_{R,1}^{BS} = 52^\circ; \varphi_{R,1}^{BS} = 54^\circ; \theta_{R,2}^{BS} = 50^\circ; \varphi_{R,2}^{BS} = 56^\circ$$

Таблица 4. Значения пространственного спектра, дБ, в области угловых координат равно-
 мощных ИРИ: $\theta_{R,1}^{BS} = 52^\circ$; $\varphi_{R,1}^{BS} = 54^\circ$; $\theta_{R,2}^{BS} = 50^\circ$; $\varphi_{R,2}^{BS} = 56^\circ$; $SINR = 30$ дБ; $N_{BS} = 256$, шаг 1°

$\lambda_1 = 36.319$ $\lambda_2 = 0.041$		$\hat{\varphi}_R^{BS}$								
		$SINR = 30$ дБ								
		54.00°	54.25°	54.50°	54.75°	55.00°	55.25°	55.50°	55.75°	56.00°
$\hat{\theta}_R^{BS}$	50.00°	-31.33	-30.19	-28.86	-27.27	-25.322	-22.79	-19.18	-12.92	-0.53
	50.25°	-30.21	-28.89	-27.32	-25.40	-22.916	-19.42	-13.53	-1.10	-13.83
	50.50°	-28.93	-27.37	-25.47	-23.05	-19.717	-14.59	-8.45	-14.55	-19.70
	50.75°	-27.41	-25.52	-23.14	-19.93	-15.336	-11.21	-15.47	-20.00	-23.16
	51.00°	-25.57	-23.18	-20.01	-15.62	-12.202	-16.02	-20.26	-23.31	-25.61
	51.25°	-23.22	-19.99	-15.47	-11.97	-16.055	-20.34	-23.39	-25.68	-27.49

$\lambda_1 = 36.319$ $\lambda_2 = 0.041$	$\hat{\phi}_R^{BS}$									
	SINR = 30 дБ									
	54.00°	54.25°	54.50°	54.75°	55.00°	55.25°	55.50°	55.75°	56.00°	
	$\hat{\theta}_R^{BS}$									
51.50°	-19.98	-15.04	-10.41	-15.51	-20.192	-23.36	-25.69	-27.52	-29.02	
51.75°	-14.75	-6.76	-14.33	-19.80	-23.188	-25.61	-27.49	-29.02	-30.31	
52.00°	0	-12.53	-19.19	-22.89	-25.45	-27.4	-28.97	-30.28	-31.41	
SINR = 20 дБ										
50.00°	-27.09	-25.94	-24.61	-23.03	-21.09	-18.57	-15.01	-9.05	-0.51	
50.25°	-25.97	-24.65	-23.08	-21.16	-18.69	-15.22	-9.52	-0.06	-9.82	
50.50°	-24.69	-23.13	-21.23	-18.81	-15.50	-10.47	-4.78	-10.46	-15.5	
50.75°	-23.17	-21.28	-18.90	-15.70	-11.16	-7.19	-11.31	-15.78	-18.93	
51.00°	-21.33	-18.94	-15.78	-11.43	-8.09	-11.83	-16.03	-19.07	-21.36	
51.25°	-18.99	-15.77	-11.29	-7.87	-11.89	-16.11	-19.15	-21.43	-23.24	
51.50°	-15.78	-10.91	-6.44	-11.35	-15.97	-19.11	-21.44	-23.27	-24.77	
51.75°	-10.69	-3.41	-10.23	-15.59	-18.95	-21.37	-23.25	-24.77	-26.05	
52.00°	0	-8.61	-15.01	-18.67	-21.21	-23.15	-24.72	-26.03	-27.15	
SINR = 10 дБ										
50.00°	-18.88	-17.57	-16.02	-14.13	-11.73	-8.49	-3.85	0	-18.88	
50.25°	-17.61	-16.06	-14.19	-11.82	-8.65	-4.15	-0.24	-4.31	-17.61	
50.50°	-16.12	-14.25	-11.91	-8.82	-4.58	-1.18	-4.65	-8.85	-16.12	
50.75°	-14.32	-11.98	-8.92	-4.84	-1.79	-4.98	-8.99	-11.98	-14.32	
51.00°	-12.07	-8.99	-4.89	-1.83	-5.04	-9.05	-12.05	-14.31	-12.08	
51.25°	-9.13	-4.87	-1.36	-4.76	-8.95	-12.01	-14.31	-16.13	-9.13	
51.50°	-5.07	-0.72	-4.16	-8.70	-11.89	-14.25	-16.11	-17.63	-5.07	
51.75°	-0.93	-3.52	-8.31	-11.67	-14.12	-16.03	-17.59	-18.89	-0.93	

Фрагменты пространственных спектров для случая АР, состоящей из 64 элементов, полученные аналогичным образом, представлены на рис. 8.

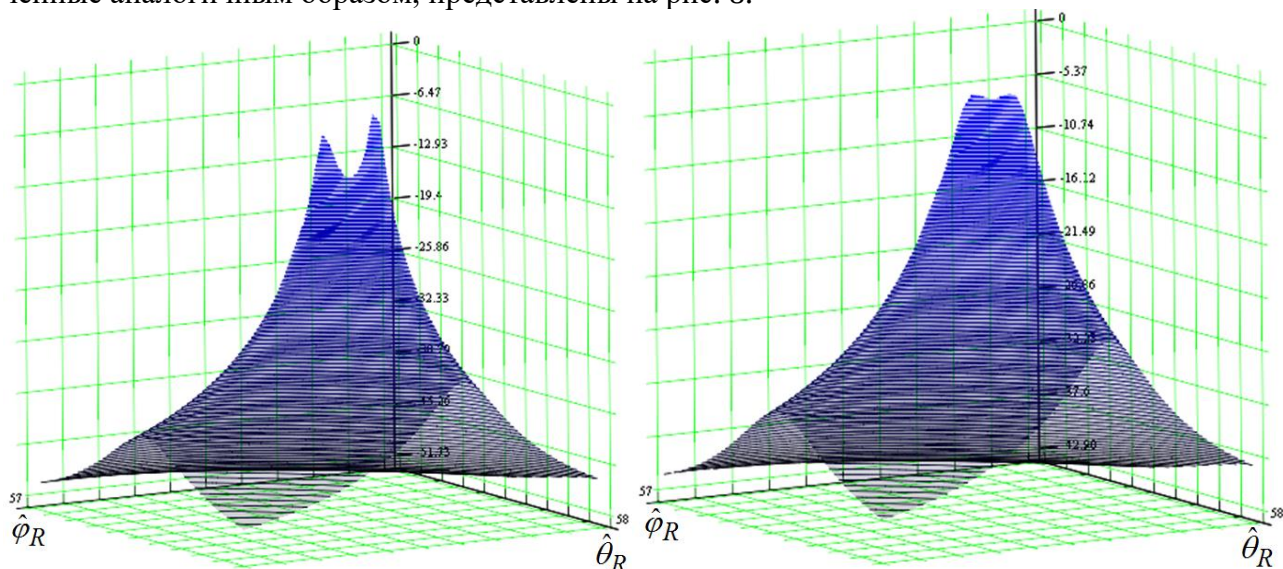


Рис. 8. Фрагмент пространственного спектра $N_{BS} = 64$; а) SINR = 30 дБ; б) SINR = 20 дБ;

$$\theta_{R,1}^{BS} = 52^\circ; \phi_{R,1}^{BS} = 54^\circ; \theta_{R,2}^{BS} = 50^\circ; \phi_{R,2}^{BS} = 56^\circ$$

Результаты численных экспериментов средствами имитационного моделирования показали, что разрешение равномошных и неравномошных ИРИ для $N_{BS} = 64$ и разноре источников по угловым координатам на 2° возможно при значениях $\text{SINR} \geq 30$ дБ. Для АР с 16 антенными элементами разрешение ИРИ оказалось невозможным.

В работе также была произведена оценка разрешающей способности алгоритма при разноре равномошных ИРИ по угловым координатам на величину, равную 1° . На рис. 9

представлен характерный фрагмент пространственного спектра для приёма сигналов эквидистантной плоской АР с 256 элементами и значением SINR = 30 дБ. Результаты численных экспериментов средствами имитационного моделирования показали, что при разноте ИРИ по угловым координатам на 1° разрешение источников оказывается невозможным.

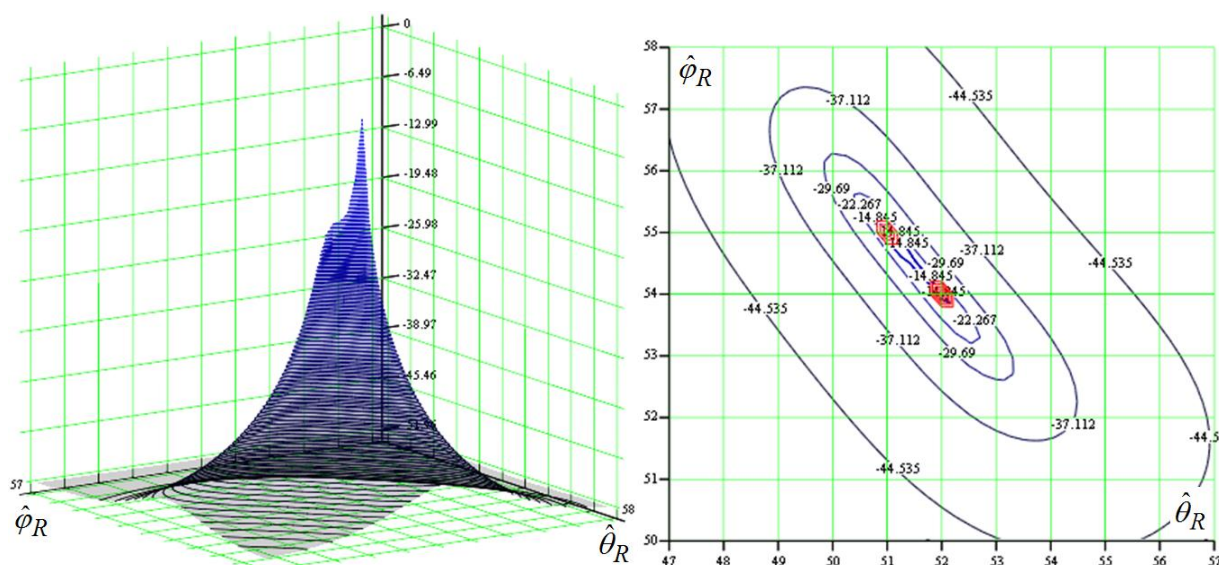


Рис. 9. а) фрагмент пространственного спектра $N_{BS} = 256$; SINR = 30 дБ;

б) изолинии спектра в области рассчитанных угловых координат ИРИ

$$\theta_{R,1}^{BS} = 52^\circ; \phi_{R,1}^{BS} = 54^\circ; \theta_{R,2}^{BS} = 51^\circ; \phi_{R,2}^{BS} = 55^\circ$$

4. Заключение

В настоящей работе были исследованы потенциальные возможности алгоритма комбинированного измерения азимута и угла места 2D-MUSIC в сценарии диаграммообразования сверхплотных сетей радиодоступа, который позволяет базовым станциям, работающим в диапазоне частот FR2, формировать диаграммы направленности на основе данных об угловых координатах подвижных устройств. С помощью разработанной и реализованной программы имитационного моделирования был произведен ряд численных экспериментов, которые позволили установить следующие зависимости по оценке допустимого углового разнота устройств для сценария диаграммообразования в сверхплотных сетях радиодоступа миллиметрового диапазона.

Во-первых, разрешающая способность алгоритма 2D-MUSIC достигается при количестве элементов антенной решётки $N_{BS} \geq 64$ и угловым разноте устройств в 2° . Данные условия позволяют обеспечить точность, необходимую для подавляющего числа сценариев диаграммообразования на основе позиционирования в сетях пятого поколения. Однако в случае применения антенных решёток с количеством элементов $N_{BS} = 64$ должны выполняться требования к допустимому отношению сигнал/помеха $\text{SINR} \geq 30$ дБ. Также необходимо учитывать, что в реальных условиях могут иметь место амплитудно-фазовые ошибки, обусловленные рядом факторов, таких как [9]: погрешности в геометрическом расположении элементов АР, взаимное влияние элементов АР, имеющее сложную зависимость от направления прихода сигналов. Данные погрешности оказывают негативное влияние на точностные характеристики и разрешающую способность алгоритма 2D-MUSIC и являются предметом дальнейших исследований.

Во-вторых, точность оценки допустимого углового разнота устройств для рассмотренного алгоритма снижается по мере приближения количества отслеживаемых ИРИ к количеству элементов АР. В то же время планируемая плотность устройств в сетях связи пятого поколения

может достигать значений $10^6/\text{км}^2$. Это может привести к сценарию, когда количество обнаруживаемых устройств может достигать нескольких десятков или сотен, что обуславливает необходимость использования устройствами антенных решёток с количеством элементов не менее 64.

Литература

1. Дорожная карта развития «сквозной» цифровой технологии «Технологии беспроводной связи» [Электронный ресурс] // Официальный интернет-ресурс Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации: [сайт]. [2019]. URL: <https://digital.gov.ru/uploaded/files/07102019tbs.pdf> (дата обращения: 29.06.2022).
2. Петров В. П., Якушев И. Ю. Современные технологии в системе MIMO // Вестник СибГУТИ. 2019. № 2. С. 94–108.
3. Калачиков А. А., Безгодкин Р. О., Петров И. А., Винников А. А. Исследование модели канала связи MIMO на основе открытого пакета моделирования // Вестник СибГУТИ. 2021. № 4 (56). С. 43–55.
4. Фокин Г. А. Процедуры выравнивания лучей устройств 5G NR // Электросвязь. 2022. № 2. С. 26–31.
5. Фокин Г. А. Модели управления лучом в сетях 5G NR. Часть 1. Выравнивание лучей при установлении соединения // Первая Миля. 2022. № 1. С. 42–49.
6. Фокин Г. А. Программный модуль выравнивания лучей устройств с диаграммообразованием стандарта 5G NR в режиме начального установления соединения. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021680125, 07.12.2021. Заявка № 2021669194 от 26.11.2021.
7. Фокин Г. А. Модели управления лучом в сетях 5G NR. Часть 1. Выравнивание лучей при ведении радиосвязи // Первая Миля. 2022. № 3. С. 62–69.
8. Фокин Г. А. Программный модуль выравнивания лучей устройств с диаграммообразованием стандарта 5G NR в режиме ведения радиосвязи. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021680159, 07.12.2021. Заявка № 2021669201 от 26.11.2021.
9. Ратынский М. В. Адаптация и сверхразрешение в антенных решётках. М.: Радио и связь, 2003. 200 с.
10. Баданис К. А., Иоанидес П. И. Введение в смарт-антенны. М.: Техносфера, 2012. 200 с.
11. OnQ Blog. Our 5G vision is closer to reality than ever [Электронный ресурс]. URL: <https://www.qualcomm.com/news/onq/2018/02/our-5g-vision-closer-reality-ever> (дата обращения: 29.06.2022).
12. Qualcomm QTM527 mmWave antenna module [Электронный ресурс]. URL: <https://www.qualcomm.com/products/qtm527-mmwave-antenna-module> (дата обращения: 29.06.2022).
13. Qualcomm Snapdragon X65 5G Modem-RF System [Электронный ресурс]. URL: <https://www.qualcomm.com/products/snapdragon-x65-5g-modem-rf-system> (дата обращения: 29.06.2022).
14. Akdeniz M., Liu Y., Samimi M., Sun S., Rangan S., Rappaport T., and Erkip E. Millimeter wave channel modeling and cellular capacity evaluation // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2014. V. 32, № 6. P. 1164–1179.
15. Abu-Shaban Z., Zhou X., Abhayapala T., Seco-Granados G. and Wymeersch H. Error Bounds for Uplink and Downlink 3D Localization in 5G Millimeter Wave Systems // IEEE Transactions on Wireless Communications. 2018. V. 17, № 8, P. 4939–4954.
16. 3GPP TR 38.901 V16.1.0 Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz. Release 16. dec. 2019.

17. 3GPP TS 38.101-2 V17.5.0 User Equipment (UE) radio transmission and reception; Part 2: Range 2 Standalone, march 2022.
18. Zhang X., Xu L., Xu L. and Xu D., Direction of Departure (DOD) and Direction of Arrival (DOA) Estimation in MIMO Radar with Reduced-Dimension MUSIC // IEEE Communications Letters. 2010. V. 14, № 12, P. 1161–1163.
19. 3GPP TS 22.261 V17.3.0. Service requirements for the 5G system, Stage 1. 2020.
20. Чижов А. А. Аналитическая оценка эффективности разрешения групповых сосредоточенных целей проекционными методами // Информационно-управляющие системы. 2009. № 6 (43). С. 12–17.
21. Чижов А. А., Курочкин А. Н. Экспериментальные исследования эффективности проекционных методов сверхрешеевского разрешения // 12-я Международная конференция «Цифровая обработка сигналов и ее применение». М.: РНТОРЭС им. А.С. Попова, 2010. С. 187–189.
22. Серебряков Г. В. Разрешающая способность адаптивных антенных решеток при наличии флуктуаций параметров // Журнал радиоэлектроники. 2003. №. 5. С. 3.
23. Фомин А. Н., Тяпкин В. Н., Дмитриев Д. Д. Теоретические и физические основы радиолокации и специального мониторинга: учебник / под ред. Ищук И. Н. Красноярск: СФУ, 2016. 292 с.

*Статья поступила в редакцию 22.07.2022;
переработанный вариант — 17.09.2022.*

Гришин Илья Владимирович

к.т.н., доцент кафедры сетей связи и передачи данных СПбГУТ (193232, Санкт-Петербург, пр. Большевиков д. 22, к.1), тел. (812) 305-12-74, e-mail: i.v.grischin@mail.ru.

Фокин Григорий Алексеевич

д.т.н., доцент, профессор кафедры радиосвязи и вещания СПбГУТ (193232, Санкт-Петербург, пр. Большевиков д. 22, к.1), тел. (812) 305-12-68, e-mail: grihafokin@gmail.com.

Estimation of Permissible Angular Separation of Devices for the Beamforming Scenario in Ultra-Dense Millimeter-Wave Radio Access Networks

Ilya Grishin

Candidate of Engineering Sciences, The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications (SPbSUT, Saint-Petersburg, Russia), i.v.grischin@mail.ru.

Grigoriy Fokin

Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications (SPbSUT, Saint-Petersburg, Russia), grihafokin@gmail.com.

This study is devoted to estimating the allowable angular separation between devices operating in ultra-dense radio access networks in the millimeter frequency range, for the subsequent formation of a three-dimensional radiation pattern with optimal characteristics by the base station antenna array. The content of this work can be divided into two parts. In the first part of this work, a mathematical formalization of the number of radio emission sources estimation and their angular coordinates is given. Based on the presented mathematical model and the developed simulation program, in the second part of the work, the study and determination of the accuracy characteristics of the angular separation of devices depending on interference in the scenario of diagram formation of ultra-dense radio access networks when devices use the combined azimuth and elevation measurement algorithm are carried out.

Keywords: multiple signal classification algorithm, azimuth, elevation angle, spatial signal spectrum, uniform rectangular array, angular coordinate spacing.

Acknowledgment

This research is supported by the Russian Science Foundation Grant No. 22-29-00528, <https://rscf.ru/project/22-29-00528/>

References

1. Dorozhnaya karta razvitiya «skvoznoy» tsifrovoy tekhnologii «Tekhnologii besprovodnoy svyazi» ["End-to-End Digital Technology" Wireless Technology Roadmap], available at: <https://digital.gov.ru/uploaded/files/07102019tbs.pdf>, (accessed 29.06.22)
2. Petrov V. P., Yakushev I. Yu. Sovremennyye tekhnologii v sisteme MIMO [Modern technologies in the MIMO system], *Vestnik SibGUTI*, 2019, no. 2, pp. 94-108.
3. Kalachikov A. A., Bezgodkin R. O., Petrov I. A., Vinnikov A. A. Issledovaniye modeli kanala svyazi MIMO na osnove otkrytogo paketa modelirovaniya [Study of a MIMO communication channel model based on an open modeling package], *Vestnik SibGUTI*, 2021, no. 4 (56), pp. 43-55.
4. Fokin G. A. Protsedury vyravnivaniya luchey ustroystv 5G NR [Beam alignment procedures for 5G NR devices], *Electrosvyaz*, 2022, no. 2, pp. 26-31.
5. Fokin G. A. Modeli upravleniya luchom v setyakh 5G NR. Chast' 1. Vyravnivaniye luchey pri ustanovlenii soyedineniya [Beam Steering Models in 5G NR Networks. Part 1. Alignment of beams when establishing a connection], *Pervaya Milya*, 2022, no. 1, pp. 42-49.
6. Fokin G. A. Programmnyy modul' vyravnivaniya luchey ustroystv s diagrammoobrazovaniyem standarta 5G NR v rezhime nachal'nogo ustanovleniya soyedineniya. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2021680125 [Beam alignment software module for 5G NR beamforming devices in initial connection establishment mode. Certificate of state registration of the computer program no. 2021680125]. Application no. 2021669194, 2021.
7. Fokin G. A. [Beam Steering Models in 5G NR Networks. Part 1. Alignment of beams in radio communications], *Pervaya Milya*, 2022, no. 3, pp. 62-69.
8. Fokin G. A. Programmnyy modul' vyravnivaniya luchey ustroystv s diagrammoobrazovaniyem standarta 5G NR v rezhime vedeniya radiosvyazi. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2021680159 [Beam alignment software module for 5G NR beamforming devices in radio communication mode. Certificate of state registration of the computer program no. 2021680159]. Application no. 2021669201, 2021.
9. Ratynsky M. V. *Adaptatsiya i sverkhrazresheniye v antennykh reshotkah* [Adaptation and superresolution in antenna arrays], Moscow, Radio i svyaz', 2003. 200 p.
10. Badanis Konstantin A., Ioanides Panagiotis I. *Vvedeniye v smart-antenny* [Introduction to smart antennas], Moscow, Tehnosfera, 2012, 200 p.
11. Our 5G vision is closer to reality than ever, available at: <https://www.qualcomm.com/news/onq/2018/02/our-5g-vision-closer-reality-ever>, (accessed: 29.06.2022).
12. QTM527 mmWave antenna module, available at: <https://www.qualcomm.com/products/qtm527-mmwave-antenna-module>, (accessed: 29.06.2022).
13. Snapdragon X65 5G Modem-RF System, available at: <https://www.qualcomm.com/products/snapdragon-x65-5g-modem-rf-system>, (accessed: 29.06.2022).
14. Akdeniz M., Liu Y., Samimi M., Sun S., Rangan S., Rappaport T. and Erkip E. Millimeter wave channel modeling and cellular capacity evaluation, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2014, vol. 32, no. 6, pp. 1164–1179.
15. Abu-Shaban Z., Zhou X., Abhayapala T., Seco-Granados G. and Wymeersch H. Error Bounds for Uplink and Downlink 3D Localization in 5G Millimeter Wave Systems, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2018, vol. 17, no. 8, pp. 4939-4954
16. 3GPP TR 38.901 V16.1.0 Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz. Release 16. dec. 2019
17. 3GPP TS 38.101-2 V17.5.0 User Equipment (UE) radio transmission and reception; Part 2: Range 2 Standalone, march 2022.

18. Zhang X., Xu L., Xu L. and Xu D. Direction of Departure (DOD) and Direction of Arrival (DOA) Estimation in MIMO Radar with Reduced-Dimension MUSIC, *IEEE Communications Letters*, 2010, vol. 14, no. 12, pp. 1161-1163
19. 3GPP TS 22.261 V17.3.0. Service requirements for the 5G system, Stage 1. 2020.
20. Chizhov A. A. Analiticheskaya otsenka effektivnosti razresheniya gruppovykh sosredotochennykh tseley proyeksionnymi metodami [Analytical evaluation of the effectiveness of resolving group concentrated targets by projection methods], *INFORMATSIONNO-UPRAVLYAYUSHCHIYE SISTEMY*, 2009, 6(43). pp. 12–17
21. Chizhov A. A., Kurochkin A. N. Eksperimental'nyye issledovaniya effektivnosti proyeksionnykh metodov sverkhreleyevskogo razresheniya [Experimental studies of the effectiveness of projection methods of super-Rayleigh resolution]. *12-ya Mezhdunarodnaya konferentsiya «Tsifrovaya obrabotka signalov i yeyo primeneniye»* Moscow, RNTORES im. A.S. Popova, 2010, pp. 187–189
22. Serebryakov G. V. Razreshayushchaya sposobnost' adaptivnykh antennoykh reshetok pri nalichii fluktuatsiy parametrov [Resolution of adaptive antenna arrays in the presence of parameter fluctuations] *Zhurnal radioelektroniki*, 2003, no. 5, pp. 3-3.
23. Fomin A. N., Tyapkin V. N., Dmitriev D. D. *Teoreticheskiye i fizicheskiye osnovy radiolokatsii i spetsial'nogo monitoringa* [Theoretical and physical foundations of radar and special monitoring]. ed. I. N. Ischuk, Sibirskiy federal'nyy uiversitet, Krasnoyarsk, 2016, 292 p.

Математическое моделирование конкуренции двух идеологий с внутренними конфликтами

Е. С. Антипова

При изучении социальных процессов большой интерес представляет прогнозирование поведения общества или отдельных его составляющих. В настоящее время для этого активно разрабатываются методы математического моделирования и соответствующие математические модели. Создание таких моделей сопряжено с определенными трудностями – большая размерность модели, плохая формализуемость рассматриваемых объектов, многокритериальность, слабая структурированность рассматриваемой предметной области и т.п. *Цель работы* – построить математическую модель конкурентной борьбы двух идеологий с учетом спонтанных и вынужденных переходов индивидов между идеологиями, провести анализ полученной модели для определения сценариев развития идеологий, а также найти условия, при которых реализуется тот или иной сценарий. *Методы*. В данной работе проводятся параметрические исследования развития идеологий во времени при различных значениях параметров модели. Для определения условий существования разных сценариев развития идеологий исследуется устойчивость модели. *Результаты*. Предложена модель конкурентной борьбы двух идеологий с учетом спонтанных и вынужденных переходов индивидов между идеологиями. В рассмотренной модели все идеологии с течением времени приходят в устойчивые стационарные состояния. Показано, что развитие идеологий может происходить только по трем сценариям: (А) обе идеологии выживают и сосуществуют; (В) обе идеологии вымирают; и (С) одна из идеологий выживает, а другая вымирает. Определены условия существования каждого из сценариев развития идеологий. *Заключение*. Несмотря на то, что реальная рассматриваемая система является дискретной, при большом числе элементов (приверженцев идеологий) возможен переход к непрерывной модели. Уравнения, полученные в рассматриваемой модели, являются модифицированными уравнениями Лотки–Вольтерры. Анализ модели позволил вывести критерии существования различных сценариев поведения идеологий, определить границы по параметрам модели, разделяющие сценарии развития идеологий. В отличие от аналогичных работ, в данной работе учитываются спонтанные и вынужденные переходы между идеологиями, в том числе за счет внутренних конфликтов. Построенная модель может быть использована для анализа электоральных процессов, прогнозирования возникновения и развития террористических группировок, различных религиозных сообществ и т.д.

Ключевые слова: конкурентная борьба идеологий, внутренние конфликты, математическое моделирование, уравнения Лотки–Вольтерры, устойчивость.

1. Введение

В настоящее время большой интерес представляют исследования различных подходов к моделированию социальных процессов, которые отражают развитие общества и его самоорганизацию. Социальными процессами, как известно, является серия явлений взаимодействия людей друг с другом или серия явлений, происходящих в организации и структуре групп, изменяющих отношения между людьми или отношения между составными элементами общности [1]. К таким явлениям относятся, например, политика, религия и т.п. Известно, что все

процессы, изменяющие общество, сводятся либо к сближению людей, либо к их отдалению, в результате чего происходят изменения в обществе (развитие общества), предельными случаями которых являются прогресс и регресс [2].

В основе моделирования социальных процессов лежит анализ социальных механизмов, одним из которых является идеология.

В данной работе понятие «идеология» рассматривается в более широком смысле, нежели политологическая трактовка. Под идеологией здесь понимается система взглядов, концепций и идей, разделяющих общество на социальные группы по политическим, религиозным, научным (различные научные концепции, теории, взгляды и т.п.), культурным (направления моды, музыки, субкультуры и т.п.) и другим интересам [3–5].

История показывает, что общество (даже примитивное) не может существовать без идеологий. Идеологии играют одновременно объединяющую и разделяющую роль: они объединяют своих приверженцев (сторонников) и в то же время разделяют людей, придерживающихся других идеологий. Это разделение не всегда является антагонистическим.

Как правило, в обществе существует не одна, а несколько идеологий, среди которых могут быть как неконкурирующие, так и конкурирующие между собой, в том числе непримиримые. Каждая идеология имеет определенное количество адептов и ведет конкурентную борьбу с аналогичными идеологиями с целью привлечения новых приверженцев, что играет большую роль в развитии общества. Примерами непримиримых идеологий могут служить фашизм и коммунизм, коммунизм и капитализм, теория Дарвина и религия и т.д.

Большое распространение получили математические модели различного вида конкуренций, основанные на моделях Лотки–Вольтерры. Так, в работе [6] рассмотрено моделирование классовой борьбы для малых городских ареалов, где в качестве «жертвы» выступает площадь землепользования, а в качестве «хищника» – земельная рента.

В работе [7] рассмотрена конкурентная борьба между рабочим классом и капиталистами, используя допущения, что рабочие тратят весь свой доход на потребление, а капиталисты накапливают доход. Модель учитывает взаимодействие между уровнем занятости, который играет роль «жертвы», и установленной государством долей затрат на оплату труда, которая играет роль «хищника».

В работе [8] рассмотрена математическая модель стратификации общества для систем с одной и двумя партиями, которая сводится к системам двух и трех дифференциальных уравнений соответственно.

В работе [9] рассматривается модель мутуализма – взаимовыгодного взаимодействия различных систем. В социально-экономических системах эта модель также сводится к моделям внутривидовой и межвидовой конкуренции и является модификацией модели Лотки–Вольтерры для n -мерных популяционных систем.

Другой класс работ, посвященных применению математического моделирования в социальных науках, основан на математических моделях эпидемиологического типа [10, 11]. Моделирование с помощью эпидемиологической математической модели позволяет анализировать динамику отношений между различными идеологическими группами, влияние идеологий друг на друга. В работе [10] рассмотрена борьба с терроризмом с помощью построенной математической модели эпидемиологического типа. В работе [12] проанализирована дискретная модель населения для прогнозирования в краткосрочном периоде электоральной поддержки истеблишмента и экстремистских партий, а также уровня воздержавшихся и незарегистрированных избирателей.

В [13] построена агентная математическая модель для исследования формирования общественного мнения с учетом деления общества на идеологии. Предполагалось, что общество состоит из агентов двух психологических типов: с ограниченной уверенностью и относительным согласием.

Еще одним направлением исследования социальных систем является динамическая теория информации [14]. Модель борьбы условных информационных сообщений используется для описания взаимодействия однотипных видов, прогноза исторических событий, для исследования

взаимодействия валют в международной торговле и т.п. Так, в работе [15] построена и проанализирована модель динамики денежных средств в зонах действия нескольких валют. В работах [16–19] рассмотрены логико-математические модели социально-политической дестабилизации социальных систем. В работах [20] рассмотрены модели «борьбы условных информаций», отражающие соперничество цивилизаций и других глобальных акторов.

В настоящей работе рассматривается конкурентная борьба двух непримиримых идеологий и анализируются различные сценарии их развития.

2. Математическая модель конкуренции идеологий

В работе [21] предложена модель конкурентной борьбы двух непримиримых идеологий. В основе модели лежат следующие допущения:

- (1) приверженцы одной идеологии не могут быть одновременно приверженцами другой;
- (2) кроме двух рассматриваемых идеологий существует континуум – бесконечное множество людей, не являющихся приверженцами ни одной из существующих идеологий;
- (3) спонтанно или под действием пропаганды люди могут переходить из одной идеологии в другую, а также переходить в континуум или из континуума в одну из идеологий.

Необходимо отметить, что в данной работе рассматриваются две доминирующие идеологии в обществе. Все остальные субъекты, не относящиеся к рассматриваемым идеологиям, объединены в множество, названное «континуум». В действительности континуум (резервуар воззрений) может содержать в себе представителей множества мелких идеологий, а также субъектов, не поддерживающих никакую идеологию. Предполагается, что размеры континуума существенно больше размеров двух рассматриваемых идеологий, и переходы субъектов из континуума в рассматриваемые идеологии и обратно не изменяют континуум. Считается, что субъекты, входящие в континуум, под действием агитации/пропаганды со стороны двух рассматриваемых идеологий могут изменять свое мнение и перейти в одну из доминирующих идеологий. В том числе такие переходы могут совершать субъекты из континуума, которые ранее не поддерживали ни одну из идеологий. Например, в государстве имеются две доминирующие политические партии. Между выборами численность активных членов этих партий обычно небольшая (много меньше общего числа избирателей). Остальные члены общества либо не определились с выбором партии, либо отдают предпочтение мелким политическим партиям или объединениям. Поэтому их можно отнести к континууму. В результате агитации со стороны представителей двух доминирующих партий или иного влияния сторонники партий могут переходить из одной партии в другую или уходить в континуум, а субъекты из континуума – переходить в одну из доминирующих партий. Другим примером являются субкультуры. Например, не так давно доминирующими субкультурами в обществе были «металлисты» и «панки», однако большинство населения (континуум) не поддерживали ни одну из этих субкультур.

Хотя реальная рассматриваемая система является дискретной, при большом числе приверженцев идеологий возможен переход к непрерывной модели.

В результате были получены уравнения:

$$\frac{dx}{dt} = (\mu_x - \alpha_x - \nu)x + \lambda y - (\beta_x - \beta_y + \sigma_x)xy, \quad (1)$$

$$\frac{dy}{dt} = \nu x + (\mu_y - \alpha_y - \lambda)y + (\beta_x - \beta_y - \sigma_y)xy, \quad (2)$$

где x и y – количество приверженцев идеологий X и Y соответственно; $\mu_x x$ и $\mu_y y$ – скорости спонтанных переходов людей из континуума в идеологии X и Y соответственно; $\alpha_x x$ и $\alpha_y y$ – скорости спонтанных переходов в континуум представителей соответствующих

идеологий; νx и λy – скорости спонтанных переходов из X в Y и из Y в X соответственно; β_{xy} и β_{yx} – скорости переходов соответственно из X в Y и из Y в X под действием пропаганды со стороны приверженцев противоположных идеологий; σ_{xy} и σ_{yx} – скорости переходов соответственно в континуум из X и Y под действием пропаганды.

По своему смыслу все параметры $\mu_x, \mu_y, \alpha_x, \alpha_y, \nu, \lambda, \beta_x, \beta_y, \sigma_x, \sigma_y$ неотрицательные, т.к. они характеризуют вероятности соответствующих переходов.

Обозначая

$$a = \mu_x - \alpha_x - \nu, b = \beta_x - \beta_y + \sigma_x, g = \mu_y - \alpha_y - \lambda, r = \beta_y - \beta_x + \sigma_y, \quad (3)$$

получим уравнения

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= ax + \lambda y - bxy \\ \frac{dy}{dt} &= \nu x + gy - rxy \end{aligned} \quad (4)$$

где $\lambda, \nu \geq 0$, а параметры a, b, g и r могут принимать любые значения.

3. Моделирование конкуренции двух идеологий с учетом внутренней напряженности

Модель, описываемая уравнениями (4), не учитывает наличие разногласий внутри каждой идеологии, которые также могут приводить к переходам людей из одной идеологии в другую. Рассмотрим модель конкурентной борьбы n идеологий с учетом внутренних конфликтов в каждой из идеологий, обобщающую модель (1), (2):

$$\frac{dx_i}{dt} = \mu_i x_i - \sum_{j \neq i}^n \gamma_{ij} x_i - \alpha_i x_i + \sum_{j \neq i}^n \gamma_{ji} x_j - \left(\sum_{j \neq i}^n \beta_{ij} x_j \right) x_i + \left(\sum_{j \neq i}^n \beta_{ji} x_j \right) x_i - \sum_{j \neq i}^n \sigma_{ij} x_i x_j - C_i x_i^2 + \sum_{j \neq i}^n M_{ji} x_j^2, \quad (5)$$

где $\gamma_{ij} x_i$ – скорость спонтанного перехода из идеологии i в идеологию j ; $\beta_{ij} x_i x_j$ – скорость перехода из идеологии i в идеологию j под действием пропаганды со стороны представителей идеологии j ; μ_i – вероятность спонтанного перехода из континуума в идеологию i ; α_i – вероятность спонтанного перехода представителя идеологии i в континуум; σ_{ij} – вероятность обдуманного перехода в континуум из идеологии i в результате общения представителей попарно разных идеологий i, j ; $C_i x_i^2$ – скорость, с которой представители идеологии i переходят в другие идеологии и в континуум под воздействием внутренних конфликтов в идеологии i ; $M_{ji} x_j^2$ – скорость, с которой представители идеологии j переходят в идеологию i под воздействием внутренних конфликтов в идеологии j .

Параметры C_i и M_{ji} должны удовлетворять естественному условию

$$C_i \geq \sum_{j \neq i}^n M_{ij}, \quad (6)$$

так как часть людей, уходящих из идеологии i за счет внутренних конфликтов, может переходить в континуум.

Уравнение (5) можно привести к каноническому виду

$$\frac{dx_i}{dt} = \left(a_i - \sum_{j=1}^n b_{ij} x_j \right) x_i + \sum_{j \neq i}^n (\gamma_{ji} + M_{ji} x_j) x_j, \quad (7)$$

где $a_i = \mu_i - \alpha_i - \sum_{j \neq i}^n \gamma_{ij}$; $b_{ij} = (\beta_{ij} - \beta_{ji} + \sigma_{ij})$ при $i \neq j$ и $b_{ii} = C_i$.

Уравнения (7) являются модификацией уравнений, описывающих детерминированную модель Лотки – Вольтерры. Подобные уравнения были рассмотрены в работах [22–26] применительно к биологическим системам: популяциям видов [22]; микробиомам [23], пищевым цепочкам [24], мозговой активности [25]; экологическим системам [26]; прогнозированию развития технологий [27]; социальным системам [28, 29].

В отличие от работ [6–9, 28, 29], модель (7) рассмотрена в более общем виде, в ней учитываются спонтанные и вынужденные переходы между идеологиями, в том числе за счет внутренних конфликтов.

Рассмотрим частный случай для $n = 2$.

Введем обозначения $C_1 = c; C_2 = d; M_{21} = m; M_{12} = l; a_1 = a; a_2 = g; b_{12} = r; b_{21} = b; \gamma_{12} = \nu; \gamma_{21} = \lambda$.

Параметры $c, d, \lambda, \nu, m, l \geq 0$, a, b, g, r – любые. Из условия (6) следует, что

$$c \geq l, d \geq m. \quad (8)$$

В результате уравнения (5) для двух идеологий принимают вид

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= ax + \lambda y - bxy - cx^2 + my^2 \\ \frac{dy}{dt} &= \nu x + gy - rxy - dy^2 + lx^2 \end{aligned} \quad (9)$$

Значимую роль в уравнениях (9) играют члены $\lambda y + my^2$ и $\nu x + lx^2$, $\lambda, \nu, m, l > 0$. Отличительной особенностью любой идеологии является постоянная внутренняя борьбы между ее сторонниками, которая приводит к возникновению течений и ответвлений внутри идеологии и, как результат, к зарождению новой конкурирующей идеологии. Таких примеров в истории известно великое множество, начиная от зарождения христианства в недрах иудаизма, разделения христианства на католиков и православных, зарождения протестантизма в недрах католической религии и т.д. и заканчивая возникновением различных музыкальных направлений в результате ответвления от ранее существовавших. Ни одна идеология не может возникнуть на пустом месте: для ее возникновения необходимо, чтобы субъекты, ранее придерживавшиеся других идеологий, по каким-либо причинам начали отказываться от них и формировать новую идеологию. Именно это отражают члены $\lambda y + my^2$ и $\nu x + lx^2$ в уравнениях (9), описывающие в том числе и зарождение новой идеологии.

Полученные уравнения (9) при $\lambda, \nu, m, l = 0$ переходят в уравнения в форме Ферхюльста для моделей с учетом самоограничений роста численности популяций и с учетом скоростей размножения отдельных видов [30].

Из (3) получим условия для a, b, g, r :

$$b + r = \sigma_x + \sigma_y \geq 0. \quad (10)$$

$$a + \nu = \mu_x - \alpha_x. \quad (11)$$

$$g + \lambda = \mu_y - \alpha_y. \quad (12)$$

С учетом условий (8) и (10) были проведены параметрические исследования системы (9) и установлено, что идеологии могут развиваться по следующим сценариям (см. Приложение).

(А) Идеологии одновременно сосуществуют (рис. 1), причем в начале своего существования в каждой из идеологий может происходить рост числа приверженцев, что показывает

интерес к вновь возникшей идеологии. С течением времени в каждой из идеологий происходит стабилизация числа приверженцев. Примером такой ситуации служат политические партии, существующие длительное время.

(В) Асимптотическое вымирание идеологий. В этом случае наблюдается асимптотический спад числа приверженцев обеих идеологий с течением времени, хотя в начальный период возможен рост числа адептов (рис. 2). Примерами могут служить исчезнувшие субкультуры – эмо, панки, хиппи. В данной статье не рассматривается, куда переходят приверженцы распавшихся идеологий, считается, что они уходят в континуум, который сам по себе тоже можно рассматривать как отдельную третью идеологию, но с очень большим числом приверженцев.

(С) Одна идеология выживает, причем число ее приверженцев стабилизируется с течением времени, а другая – вымирает (рис. 3). Примерами могут служить исчезнувшие политические партии, направления в моде, субкультуры, виды спорта и т.п.

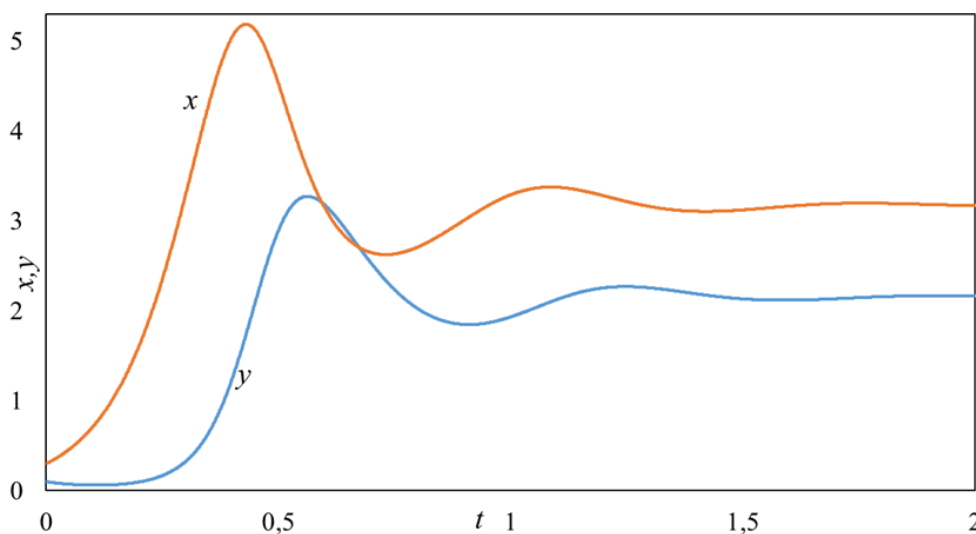


Рис. 1. Сценарий А. Поведение идеологий при $a = 9$; $g = -10$; $r = -3$; $\nu = 0.4$; $b = 4$; $\lambda = 0.7$; $c = 0.5$; $m = 0.5$; $d = 0.7$; $l = 0.3$

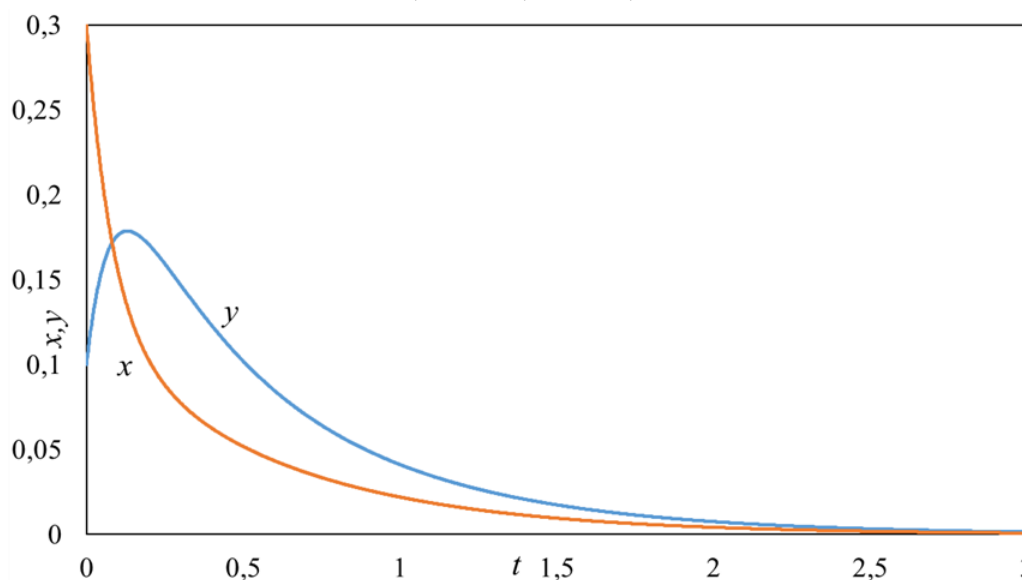


Рис. 2. Сценарий В. Поведение идеологий при $a = -7$; $g = -5$; $r = -4$; $\nu = 6$; $b = 7$; $\lambda = 3$; $c = 4$; $m = 1$; $d = 2$; $l = 3$

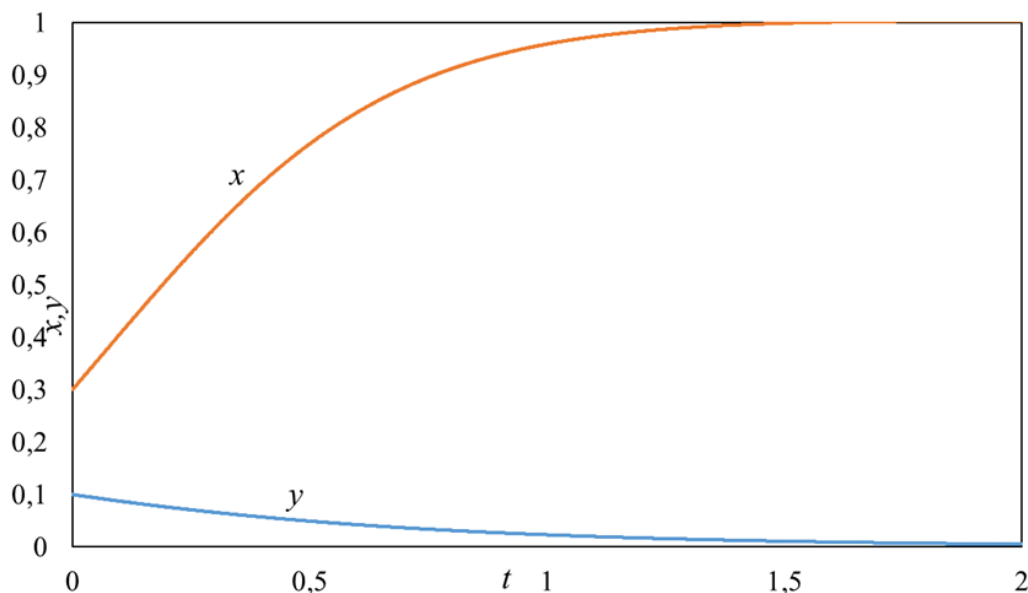


Рис. 3. Сценарий С. Поведение идеологий при $a = 3$; $g = -1$; $r = 0.5$; $v = 0$; $b = 3$; $\lambda = 5$; $c = 3$; $m = 1$; $d = 2$; $l = 0$

Параметрические исследования показали, что при различных значениях параметров системы идеологии всегда приходят в устойчивое стационарное состояние, т.е. число приверженцев идеологий со временем стабилизируется. Это, однако, не означает, что идеологии становятся дружественными, т.к. борьба за адептов продолжается на протяжении всей жизни идеологии.

Представляет интерес рассмотреть влияние параметров системы на сценарий, по которому будут развиваться идеологии. Рассмотрим пары однотипных параметров системы (9), которые имеют одинаковый смысл: (a, g) , (λ, v) , (b, r) , (c, d) , (m, l) . Будем изменять лишь одну пару параметров при фиксированных других парах. На рис. 4 в координатах (a, g) показано, по какому сценарию будут развиваться идеологии. Расчеты показывают, что в этом случае существуют только два сценария: сосуществования идеологий (сценарий А) и асимптотическое вымирание обеих идеологий (сценарий В). Сценарий В реализуется, только когда оба параметра a и g отрицательные. Сценарий А может быть реализован как при отрицательных, так и при положительных значениях параметров a и g .

Реализация сценария В означает, что стационарное состояние $x = 0$, $y = 0$ является устойчивым.

Поэтому исследуем на устойчивость к малым возмущениям стационарное состояние $x = 0$, $y = 0$. В линейном приближении уравнения (9) принимают вид:

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= ax + \lambda y \\ \frac{dy}{dt} &= vx + gy \end{aligned} \quad (13)$$

Решения уравнений (13) имеют вид $x, y \sim \exp(\gamma t)$.

В результате получим характеристическое уравнение

$$\gamma^2 - (a + g)\gamma + ag - \lambda v = 0, \quad (14)$$

имеющее решение

$$\gamma_{1,2} = \frac{1}{2}(a + g) \pm \sqrt{\frac{1}{4}(a + g)^2 - ag + \lambda v}. \quad (15)$$

Стационарное состояние $x = 0, y = 0$ будет устойчивым при $\operatorname{Re} \gamma_1 < 0$ и $\operatorname{Re} \gamma_2 < 0$, т.е. при

$$a + g < 0 \text{ и } \frac{1}{4}(a - g)^2 + \lambda \nu < 0 \quad (16)$$

или при

$$a + g < 0 \text{ и } ag > \lambda \nu. \quad (17)$$

Учитывая, что по условию всегда $\lambda, \nu > 0$, приходим к выводу, что условие (16) никогда не выполняется. Тогда условием устойчивости стационарного состояния $x = 0, y = 0$, а значит, и условием реализации сценария В будет условие (17). При невыполнении условия (17) будет реализовываться сценарий А. Таким образом, граница, разделяющая сценарий В от сценария А, имеет вид:

$$a + g < 0 \text{ и } ag = \lambda \nu. \quad (18)$$

Учитывая, что $\lambda, \nu > 0$, приходим к выводу, что $ag > 0$, т.е. параметры a и g должны быть одного знака. Тогда первое из условий (18) будет выполняться только при отрицательных значениях параметров a и g . Таким образом, граница, разделяющая сценарии А и В, имеет вид:

$$a < 0, g < 0 \text{ и } ag = \lambda \nu. \quad (19)$$

На рис. 4 линией показана граница раздела (19) сценариев А и В развития идеологий в координатах (a, g) , а на рис. 5 – та же граница в координатах λ, ν .

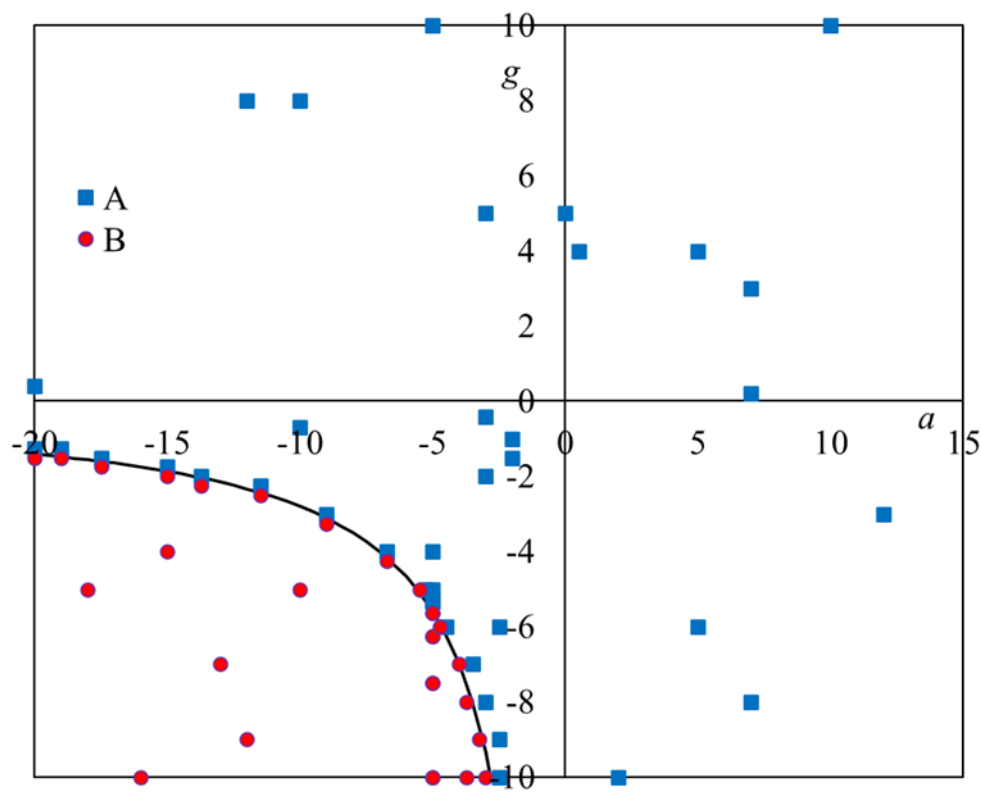


Рис. 4. Сценарии развития идеологий в координатах (a, g)

при $r = -3; \nu = 7; b = 5; \lambda = 4; c = 6; m = 1; d = 2; l = 3$.

Значки – результаты решения системы уравнений (9), линия – граница раздела сценариев А и В (19)

При фиксированных значениях параметров a, g, λ, ν изменение остальных параметров системы не приводит к изменению сценариев развития идеологий.

Если значения параметров a, g, λ, ν соответствуют сценарию А поведения идеологий, то остальные параметры влияют на стационарные уровни $x(t = \infty)$ и $y(t = \infty)$, на которые выходят идеологии, и на время их достижения. Если значения параметров (a, g) и (λ, ν)

соответствуют сценарию В, то остальные параметры отвечают за скорость вымирания обеих идеологий.

Интересным представляется случай, когда выживает только одна из идеологий, а другая перестает существовать (сценарий С). Исследования показали, что необходимыми условиями для реализации сценария С являются (см. Приложение):

$$\nu = 0, l = 0 \quad (20)$$

либо

$$\lambda = 0, m = 0. \quad (21)$$

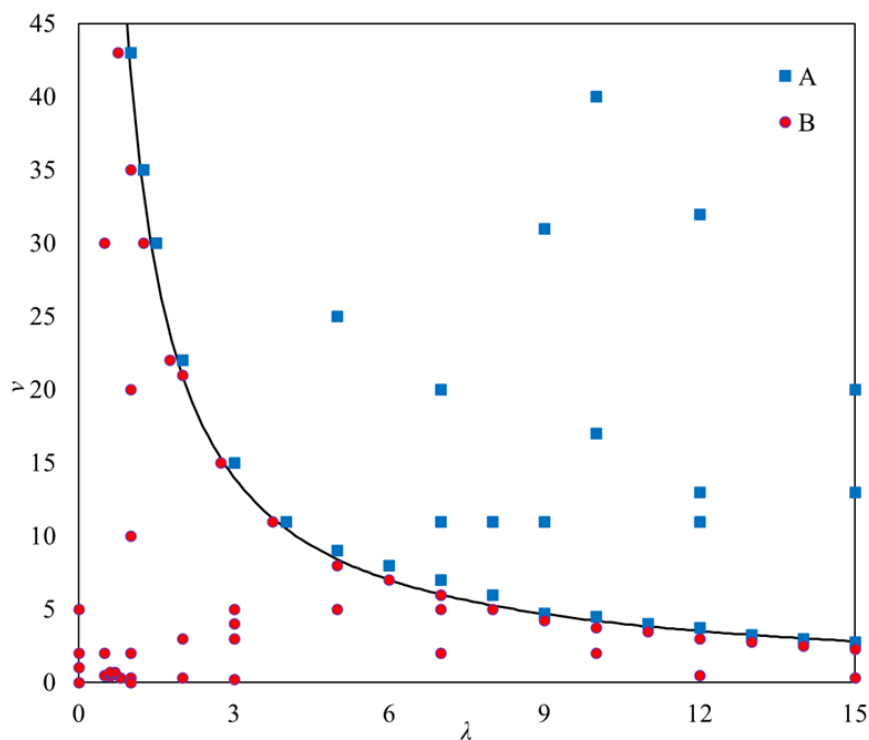


Рис. 5. Сценарии развития идеологий в координатах (λ, ν)
при $a = -7, g = -6, r = -3; b = 5; c = 6; m = 1; d = 2; l = 3$.

Значки – результаты решения системы уравнений (9), линия – граница раздела сценариев А и В (19)

Условия (20) или (21) означают, что в системе отсутствуют односторонние переходы между идеологиями – как спонтанные, так и из-за внутренних конфликтов. Так, при выполнении условия (20), но при $\lambda \neq 0$ и $m \neq 0$ отсутствуют спонтанные переходы и переходы, связанные с внутренними конфликтами, из идеологии X в идеологию Y , но возможны такие переходы из Y в X . В этом случае идеология Y исчезает, а идеология X выживает и стабилизируется, становясь единственной (господствующей) идеологией (отметим, что континуум не рассматривается в качестве идеологии, т.к. он содержит множество индивидуумов, не связанных никакими идеологиями). При выполнении условий (21) и невыполнении условий (20), наоборот, идеология X вымирает, а поведение идеологии Y стабилизируется.

Для того, чтобы найти условие существования сценария С, исследуем на устойчивость к малым возмущениям стационарное состояние $y = 0, x \neq 0$. Пренебрегая всеми членами с y в первом уравнении (9) и квадратами y во втором уравнении (9), приведем уравнения (9) к виду

$$\frac{dx}{dt} = ax - cx^2, \quad (22)$$

$$\frac{dy}{dt} = y(g - rx). \quad (23)$$

Решение уравнения (22) имеет вид:

$$x = \frac{a}{c + \left(\frac{a}{x_0} - c \right) \exp(-at)}. \quad (24)$$

Подставляем решение (24) в уравнение (23), после интегрирования получим:

$$\frac{y}{y_0} = \exp \left(gt - \frac{r}{c} \ln \left(\frac{\left| \exp(at) + \left(\frac{a}{x_0 c} - 1 \right) \right|}{\frac{|a|}{x_0 c}} \right) \right). \quad (25)$$

При $a > 0$ и $t \rightarrow \infty$ получим:

$$x \rightarrow \frac{a}{c}$$

$$\frac{y}{y_0} = \exp \left(\left(g - \frac{ra}{c} \right) t + \frac{r}{c} \ln \left(\frac{x_0 c}{|a|} \right) \right). \quad (26)$$

Состояние $y = 0$ устойчиво только при $g < \frac{ra}{c}$.

При $a < 0$ и $t \rightarrow \infty$ получим

$$x \rightarrow 0$$

$$\frac{y}{y_0} = \exp \left(gt - \frac{r}{c} \ln \left(\frac{\left| \left(\frac{a}{x_0 c} - 1 \right) \right|}{\frac{|a|}{x_0 c}} \right) \right) \quad (27)$$

Состояние $y = 0$ устойчиво только при $g < 0$. Однако в этом случае реализуется сценарий В.

Таким образом, при выполнении условий (20) достаточным условием реализации сценария С является:

$$a > 0 \text{ и } g < \frac{ra}{c}. \quad (28)$$

По аналогии при выполнении условий (21) достаточным условием реализации сценария С является:

$$g > 0 \text{ и } a < \frac{bg}{d}. \quad (29)$$

Отметим, что рассмотренная модель не приводит к колебательным процессам, что соответствует реальному развитию идеологий в обществе. Это обусловлено тем, что, как правило, интересы общественных классов и социальных групп являются относительно постоянными, что обеспечивает размеренное существование и функционирование идеологий [31]. На начальном этапе развития идеологий могут наблюдаться колебания численности их сторонников, что отражает волнообразный интерес общества к новым идеям: циклы «отрицание – принятие», заканчивающиеся привыканием.

4. Заключение

Необходимо отметить, что похожая модель была рассмотрена в работах [28, 29], где предложена базовая модель конкурентной борьбы в социальных и биологических системах, записанная в общем виде. Однако для применения этой модели к конкретной системе (будь то

биологическая или социальная система) необходимо четко установить смысл различных составляющих применительно именно к этой системе и указать диапазоны параметров, входящих в уравнения. В данной работе получена конкретная система уравнений, описывающих конкурентную борьбу двух идеологий при наличии континуума с учетом спонтанных и вынужденных (под действием пропаганды и внутренних конфликтов) переходов субъектов между идеологиями, дано обоснование каждого слагаемого с указанием его физического смысла и ограничений, накладываемых на параметры, характеризующие различные процессы. Для этой конкретной системы рассмотрены различные сценарии развития идеологий и определены диапазоны параметров, соответствующих разным сценариям.

Таким образом, показано, что существует три сценария, по которым могут развиваться идеологии: сценарий А – сосуществование идеологий, когда с течением времени число приверженцев в каждой идеологии стабилизируется; сценарий В – асимптотическое вымирание обеих идеологий; сценарий С – вымирание одной идеологии и стабилизация числа приверженцев другой. Определена граница по параметрам системы, разделяющая сценарии А и В, при переходе через которую один сценарий развития идеологий меняется на другой. Получены условия реализации сценария С.

Данная модель может быть применена для анализа поведения различных идеологических групп: политических партий, экстремистских группировок, религиозных сообществ и т.п.

Приложение

Найдем стационарные решения системы (9), которые удовлетворяют уравнениям

$$\begin{cases} ax + \lambda y - bxy - cx^2 + my^2 = 0 \\ vx + gy - rxy - dy^2 + lx^2 = 0 \end{cases} \quad (30)$$

Рассмотрим возможные решения уравнений (30).

1. Решение при $x = 0$.

В этом случае уравнения (30) примут вид:

$$\begin{cases} \lambda y + my^2 = 0 \\ gy - dy^2 = 0 \end{cases} \quad (31)$$

Уравнения (31) имеют два решения: $y = 0$ или $y \neq 0$. В последнем случае возможны три варианта, зависящие от параметров системы, а именно:

1.1. при $m = 0, \lambda = 0$ имеем решение $y = \frac{g}{d}$; т.к. $y > 0$ и $d > 0$ по условию задачи, то это решение существует только при $g > 0$;

1.2. при $d = 0, g = 0$ получим $y = -\frac{\lambda}{m} < 0$, что не имеет физического смысла (по условию задачи $m > 0, \lambda > 0$);

1.3. при $m \neq 0, \lambda \neq 0, d \neq 0, g \neq 0$ должно быть $\lambda d + mg = 0$, откуда следует, что $g = -\frac{\lambda d}{m} < 0$; при этом решение $y = \frac{g}{d} > 0$ возможно только при $g > 0$, что приводит к противоречию.

1.4. Таким образом, для рассматриваемого случая возможны только два стационарных состояния системы: $(0; 0)$ и $\left(0; \frac{g}{d}\right)$ при $g > 0$.

2. Решение при $y = 0$.

В этом случае уравнения (30) примут вид:

$$\begin{cases} ax - cx^2 = 0 \\ vx + lx^2 = 0 \end{cases}. \quad (32)$$

Уравнения (32) имеют два решения: $x = 0$ или $x \neq 0$. В последнем случае возможны три варианта, зависящие от параметров системы, а именно:

2.1. при $v = 0, l = 0$ имеем решение $x = \frac{a}{c}$; т.к. $x > 0$ и $c > 0$ по условию задачи, то это решение существует только при $a > 0$;

2.2. при $a = 0, c = 0$ получим $x = -\frac{v}{l} < 0$, что не имеет физического смысла (по условию задачи $l > 0, v > 0$);

2.3. при $a \neq 0, c \neq 0, v \neq 0, l \neq 0$ должно быть $al + vc = 0$, откуда следует, что $a = -\frac{vc}{l} < 0$; при этом решение $x = \frac{a}{c} > 0$ возможно только при $a > 0$, что приводит к противоречию.

Таким образом, для рассматриваемого случая возможны только два стационарных состояния системы: $(0; 0)$ и $\left(\frac{a}{c}; 0\right)$ при $a > 0$.

3. Решение при $x \neq 0, y \neq 0$.

В этом случае при любых допустимых значениях параметров системы (исключая те, что соответствуют пп. 1.1. и 2.1) имеем систему двух уравнений второй степени относительно двух неизвестных (x, y) .

Как легко проверить, с геометрической точки зрения каждое уравнение системы (30) описывает гиперболу. Таким образом, решением системы уравнений (30) будут точки пересечения двух гипербол.

Формальное решение системы уравнений в виде каких-то формул не имеет смысла, т.к. кроме сложного вида оно будет содержать в себе 10 параметров системы в разных комбинациях, и ценность такого решения будет невелика.

Тем более не имеет смысла исследовать каждое из этих решений на устойчивость, т.к. в общем случае не удастся из этого анализа получить какую-либо полезную информацию. Такой анализ малоинформативен еще и по той причине, что конкретные значения параметров для реальной системы, как правило, не известны.

Вместе с тем с практической точки зрения не играет роли, какие конкретно состояния $(x \neq 0, y \neq 0)$ рассматриваемой системы существуют и какие из них являются устойчивыми. Гораздо больший интерес представляет выяснить, при каких условиях выживут одновременно обе идеологии, независимо от того, сколько при этом у каждой из них будет сторонников, т.е. независимо от того, в каком конкретном состоянии $(x \neq 0, y \neq 0)$ они окажутся.

Таким образом, рассматриваемая система может иметь только три типа стационарных состояний: (i) состояние без идеологий – состояние $(0, 0)$, (ii) состояние с одной идеологией – состояние $\left(\frac{a}{c}; 0\right)$, которое возможно только при $v = 0, l = 0$ и $a > 0$ или состояние $\left(0; \frac{g}{d}\right)$,

которое возможно только при $m = 0$, $\lambda = 0$ и $g > 0$, а также (iii) состояние с двумя сосуществующими идеологиями (x_A, y_A) с $x_A \neq 0$ и $y_A \neq 0$.

Если в результате эволюции рассматриваемой системы двух идеологий она приходит в состояние $(0, 0)$, то мы говорим, что реализуется сценарий В. Если система приходит в состояние $\left(\frac{a}{c}; 0\right)$ или в состояние $\left(0; \frac{g}{d}\right)$, то мы говорим, что реализуется сценарий С. Если система приходит в любое состояние (x_A, y_A) с $x_A \neq 0$ и $y_A \neq 0$, то считается, что реализуется сценарий А.

Параметрические исследования показали, что всегда реализуется только один из этих сценариев. Поэтому в работе исследуется, при каких условиях реализуется тот или иной сценарий развития идеологий.

Литература

1. Щепаньский Я. Элементарные понятия социологии. / под общей ред. и посл. ак. А. М. Румянцева, пер. с польского М. М. Гуренко. М.: Прогресс, 1969. 237 с.
2. Park R. E., and Burgess E. W. Introduction to the Science of Sociology. Good Press, 2019. 1152 p.
3. Hamilton M. B. The elements of the concept of ideology // Political studies. 1987. V. 35, № 1. P. 18–38.
4. Матц У. Идеологии как детерминанта политики в эпоху модерна // Полис. Политические исследования. 1992. № 1–2. С. 130–142.
5. Мусихин Г. И. Идеология и культура // Полис. Политические исследования. 2012. № 1. С. 53–62.
6. Трубецков Д. И. Феномен математической модели Лотки-Вольтерры и сходных с ней // Известия вузов «Прикладная нелинейная динамика». 2011. Т. 19, № 2. С. 69–88.
7. Goodwin R. M. A Growth Model. Socialism and Growth. Cambridge: University Press, 1967.
8. Цибулин В. Г., Хосаева З. Х. Математическая модель дифференциации общества с социальной напряженностью // Компьютерные исследования и моделирование. 2019. Т. 11, № 5, С. 999–1012. DOI: 10.20537/2076-7633-2019-11-5-999-1012.
9. Журавка А. В. Моделирование конкурентно-кооперационных взаимодействий. Социально-экономические системы // Бизнес информ. 2002. № 1–2. С. 49–51.
10. Santonja F. J., Tarazona A. C., and Villanueva R. J. A mathematical model of the pressure of an extreme ideology on a society // Computers and Mathematics with Applications, 2008. V. 56, № 3. P. 836–846.
11. Wang Y., and Bu F. Modeling radicalization of terrorism under the influence of multiple ideologies // AIMS Mathematics, 2021. V. 7, № 3. P. 4833–4850. DOI: 10.3934/math.2022269.
12. De la Poza E., Jódar L., and Pricop A. Mathematical Modeling of the Propagation of Democratic Support of Extreme Ideologies in Spain: Causes, Effects, and Recommendations for Its Stop // Abstract and Applied Analysis, Hindawi. 2013. V. 2013, 729814.
13. Abrica-Jacinto N. L., Kurmyshev E., and Juárez H. A. Effects of the interaction between ideological affinity and psychological reaction of agents on the opinion dynamics in a relative agreement model // Journal of Artificial Societies and Social Simulation. 2017. V. 20, № 3. DOI: 10.18564/jasss.3377.
14. Чернавский Д. С. Синергетика и информатика. Динамическая теория информации // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2003. Т. 11, №. 6. С. 156–159.

15. *Полищук Р. Ф., Чернавский Д. С., Старков Н. И.* Борьба валют и синергетика. Россия в глобальном мире: вызовы и перспективы развития: синергетический аспект: сборник научных трудов. 2011. С. 102–109.
16. *Малков С. Ю., Коротаев А. В.* О моделировании и прогнозировании региональных и глобальных социально-политических кризисов // Системный мониторинг глобальных и региональных рисков. 2019. С. 155–173.
17. *Бухарин С. Н., Малков С. Ю.* К вопросу о математическом моделировании информационных взаимодействий // Информационные войны. 2010. Т. 2, № 14. С. 14.
18. *Малков С. Ю., Билюга С. Э.* Модель устойчивости/дестабилизации политических систем // Информационные войны. 2015. Т. 1, № 33. С. 7.
19. *Малков С. Ю., Ковалев В. И., Коссе Ю. В.* Моделирование эскалации/деэскалации межгосударственных конфликтов // Стратегическая стабильность. 2017. № 3. С. 53–63.
20. *Чернавский Д. С., Чернавская Н. М., Малков С. Ю., Малков А. С.* Математическое моделирование геополитических процессов // Стратегическая стабильность. 2002. Т. 1. С. 60–66.
21. *Закутняя Л. А., Антипова Е. С.* Модель конкурентной борьбы двух идеологий // Сборник трудов XXIII Всероссийской студенческой научно-практической конференции Нижегородского государственного университета, 2021. С. 135–142.
22. *Ризниченко Г. Ю.* Лекции по математическим моделям в биологии. 2002.
23. *Remien C. H., Eckwright M. J., and Ridenhour B. J.* Structural identifiability of the generalized Lotka–Volterra model for microbiome studies // Royal Society Open Science, 2021. V. 8, № 7. 201378.
24. *Farhan A. G.* Lotka–Volterra Model with Prey–Predators Food Chain // Iraqi Journal of Science, Special Issue. 2020. P. 56–63.
25. *Рабинович М. И., Мюезинолу М. К.* Нелинейная динамика мозга: эмоции и интеллектуальная деятельность // Успехи физических наук. 2010. Т. 180, № 4. С. 371–387.
26. *AlAdwani M., and Saavedra S.* Is the addition of higher-order interactions in ecological models increasing the understanding of ecological dynamics? // Mathematical Biosciences. 2019. V. 315, 108222.
27. *Zhang G., McAdams D. A., Shankar V., and Mohammadi Darani M.* Technology evolution prediction using Lotka–Volterra equations // Journal of Mechanical Design. 2018. V. 140, № 6. 061101.
28. *Акаев А. А., Малков С. Ю.* Геополитическая динамика: возможности логико-математического моделирования // Геополитика и безопасность. 2009. Т. 4, № 8. С. 39–55.
29. *Чернавский Д. С., Щербаков А. В., Зульпукаров М. Г. М.* Модель конкуренции // Препринты Института прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН. 2006. № 064. 20 с.
30. *Ризниченко Г. Ю.* Базовые модели Дмитрия Сергеевича Чернавского // Компьютерные исследования и моделирование. 2017. Т. 9, № 3. С. 389–395.
31. *Фельдман В. Р.* Идеология в социально-исторической динамике // Вестник Томского государственного университета. Философия. Социология. Политология, 2012. Т. 4, № 20 (1). С. 107–113.

Статья поступила в редакцию 22.07.2022.

Антипова Екатерина Сергеевна

старший преподаватель кафедры математических методов в экономике и управлении
ФГБОУ ВО «Государственный университет управления» (109542, Москва, Рязанский проспект, 99) e-mail: antipovaes@live.ru.

Mathematical modeling of the competition of two ideologies with internal conflicts

Ekaterina S. Antipova

Senior Lecturer, Department of Mathematical Methods in Economics and Management, State University of Management (109542, Moscow, Ryazansky prospekt, 99) e-mail: antipovaes@live.ru.

When studying social processes, it is of great interest to predict the behavior of society or its individual components. At present, methods of mathematical modeling and corresponding mathematical models are being actively developed for this purpose. The purpose of the work is to build a mathematical model of the competitive struggle of two ideologies taking into account the spontaneous and forced transitions of individuals between ideologies, to analyze the resulting model to determine the scenarios for the development of ideologies, and also to find the conditions under which this or that scenario is realized. Methods. In this paper, parametric studies of the development of ideologies over time are carried out for various values of the model parameters. To determine the conditions for the existence of different scenarios for the development of ideologies the stability of the model is studied. Results. A model of the competitive struggle of two ideologies is proposed taking into account spontaneous and forced transitions of individuals between ideologies. In the considered model all ideologies eventually come to stable stationary states. It is shown that the development of ideologies can occur only according to three scenarios: (A) both ideologies survive and coexist; (B) both ideologies die out, and (C) one of the ideologies survives while the other dies out. The conditions for the existence of each of the scenarios for the development of ideologies are determined. Conclusion. Despite the fact that the real system under consideration is discrete with a large number of elements (adherents of ideologies) a transition to a continuous model is possible. The equations obtained in the considered model are the modified Lotka-Volterra equations. The analysis of the model made it possible to derive criteria for the existence of various scenarios for the behavior of ideologies, to determine the boundaries by the parameters of the model that separate the scenarios for the development of ideologies. Unlike similar works this work takes into account spontaneous and forced transitions between ideologies including those due to internal conflicts. The constructed model can be used to analyze electoral processes, predict the emergence and development of terrorist groups, various religious communities, etc.

Keywords: competitive struggle of ideologies, internal conflicts, mathematical modeling, Lotka-Volterra equations, stability.

References

1. Shchepan'skij Ya. *Elementarnye ponyatiya sociologii. Pod obshchej red. i posl. ak. A.M. Rumyantseva, per. s pol'skogo M.M. Gurenko* [Elementary concepts of sociology]. ed. and post. ak. A.M. Rumyantsev, translated from Polish by M.M. Gurenko, Moscow, Progress Publ., 1969, 237 p.
2. Park R. E., and Burgess E. W. *Introduction to the Science of Sociology*. Good Press, 2019. 1152 p.
3. Hamilton M.B. The elements of the concept of ideology. *Political studies*, 1987, vol. 35, no. 1, pp. 18-38.
4. Matcz U. Ideologii kak determinanta politiki v e`poxu moderna [Ideologies as a determinant of politics in the era of modernity]. *Polis. Politicheskie issledovaniya*, 1992, no. 1-2, pp. 130-142.
5. Musixin G.I. Ideologiya i kul`tura [Ideology and culture] *Polis. Politicheskie issledovaniya*, 2012, no 1, pp. 53-62.
6. Trubeckov D.I. Fenomen matematicheskoy modeli Lotki-Vol'terry i skhodnyh s nej [The phenomenon of the Lotka-Volterra mathematical model and similar ones]. *Izvestiya vuzov «Prikladnaya nelinejnaya dinamika»*, 2011, vol. 19, no. 2, pp. 69-88.
7. Goodwin R.M. *A Growth Model. Socialism and Growth*. Cambridge: University Press, 1967.
8. Cibulin V.G., Hosaeva Z.H. Mathematical model of differentiation of society with social tension [Mathematical model of differentiation of society with social tension]. *Komp'yuternye issledovaniya i modelirovanie*, 2019, vol. 11, no 5, pp. 999-1012.
9. Zhuravka A.V. Modelirovanie konkurentno-koooperacionnyh vzaimodejstvij [Modeling of competitive and cooperative interactions]. *Social'no-ekonomicheskie sistemy. Biznes inform*, 2002, no. 1-2, pp. 49-51.
10. Santonja F.J., Tarazona A.C., and Villanueva R.J. A mathematical model of the pressure of an extreme ideology on a society. *Computers and Mathematics with Applications*, 2008. vol. 56, no. 3, pp. 836-846.
11. Wang Y., and Bu F. Modeling radicalization of terrorism under the influence of multiple ideologies. *AIMS Mathematics*, 2021. vol. 7, no. 3. pp. 4833-4850. DOI: 10.3934/math.2022269.

12. De la Poza E., Jódar L., and Pricop A. Mathematical Modeling of the Propagation of Democratic Support of Extreme Ideologies in Spain: Causes, Effects, and Recommendations for Its Stop. Abstract and Applied Analysis, Hindawi. 2013. vol. 2013, 729814.
13. Abrica-Jacinto N.L., Kurmyshev E., and Juárez H.A. Effects of the interaction between ideological affinity and psychological reaction of agents on the opinion dynamics in a relative agreement model. Journal of Artificial Societies and Social Simulation. 2017. vol. 20, no. 3. DOI: 10.18564/jasss.3377.
14. Chernavskiy D.S. Sinergetika i informatika. Dinamicheskaya teoriya informacii [Synergetics and informatics. Dynamic Information Theory] *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Prikladnaya nelineynaya dinamika*, 2003, vol. 11, no. 6, pp. 156-159.
15. Polishchuk R.F., Chernavskiy D.S., Starkov N.I. Bor'ba valyut i sinergetika. Rossiya v global'nom mire: vyzovy i perspektivy razvitiya: sinergeticheskiy aspekt: sbornik nauchnyh trudov. [The struggle of currencies and synergy. Russia in the Global World: Challenges and Prospects for Development: Synergetic Aspect: Collection of Scientific Papers]. 2011, pp. 102-109.
16. Malkov S.Yu., Korotaev A.V. O modelirovanii i prognozirovanii regional'nyh i glo-bal'nyh social'no-politicheskikh krizisov [On modeling and forecasting regional and global socio-political crises] *Sistemnyj monitoring global'nyh i regional'nyh riskov*, 2019, pp. 155-173.
17. Bukharin S.N., Malkov S.YU. K voprosu o matematicheskom modelirovanii informatsionnykh vzaimodeystviy [On the issue of mathematical modeling of information interactions.] *Informacionnye vojny*, 2010, vol. 2, no. 14, 14 p.
18. Malkov S.YU., Bilyuga S.E. Model' ustoychivosti/destabilizatsii politicheskikh system [Model of stability/destabilization of political systems] *Informacionnye vojny*, 2015, vol. 1, no 33, 7 p.
19. Malkov S.YU., Kovalev V.I., Kosse YU.V. Modelirovaniye eskalatsii/deeskalatsii mezhgosu-darstvennykh konfliktov [Modeling the escalation/de-escalation of interstate conflicts] *Strategicheskaya stabil'nost'*, 2017, no. 3. pp. 53-63.
20. Chernavskiy D.S., Chernavskaya N.M., Malkov S.YU., Malkov A.S. Matematicheskoye modeli-rovaniye geopoliticheskikh protsessov [Mathematical modeling of geopolitical processes] *Strategicheskaya stabil'nost'*, 2002, vol. 1, pp. 60-66.
21. Zakutnyaya L.A., Antipova E.S. Model' konkurentnoy bor'by dvukh ideologiy [A model of competition between two ideologies] *Trudy XXIII Vserossiyskoj studencheskoj nauchno-prakticheskoy konferencii nizhnevarstovskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2021, pp. 135-142.
22. Ryzhichenko G.YU. Lektsii po matematicheskim modelyam v biologii [Lectures on mathematical models in biology] 2002.
23. Remien C.H., Eckwright M.J., and Ridenhour B.J. Structural identifiability of the generalized Lotka–Volterra model for microbiome studies. Royal Society Open Science, 2021, vol. 8, no. 7, 210378, 2021.
24. Farhan A.G. Lotka–Volterra Model with Prey–Predators Food Chain. Iraqi Journal of Science, Special Issue, 2020, pp. 56-63.
25. Rabinovich M. I., Myuyezinolu M. K. Nelineynaya dinamika mozga: emotsii i intellektual'naya deyatel'nost' [Nonlinear brain dynamics: emotions and intellectual activity] *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 2010, vol. 180, no. 4, pp. 371-387.
26. AlAdwani M., and Saavedra S. Is the addition of higher-order interactions in ecological models increasing the understanding of ecological dynamics?. Mathematical Biosciences, 2019, vol. 315, 108222.
27. Zhang G., McAdams D.A., Shankar V., and Mohammadi Darani M. Technology evolution prediction using Lotka–Volterra equations. Journal of Mechanical Design, 2018, vol. 140, no. 6, 061101.
28. Akayev A.A., Malkov S.YU. Geopoliticheskaya dinamika: vozmozhnosti logiko-matematicheskogo modelirovaniya. [Geopolitical Dynamics: Possibilities of Logic and Mathematical Modeling] *Geopolitika i bezopasnost'*, 2009, vol. 4, no. 8, pp. 39-55.
29. Chernavskiy D.S., Shcherbakov A.V., Zul'pukarov M.G.M. Model' konkurentsii. [Competition model] *Preprinty Instituta prikladnoy matematiki im. M.V. Keldysha*, 2006, no. 0, pp. 64-20.
30. Ryzhichenko G. YU. Bazovyye modeli Dmitriya Sergeyevicha Chernavskogo [Basic models of Dmitry Sergeevich Chernavsky] *Komp'yuternye issledovaniya i modelirovanie*, 2017, vol. 9, no. 3. pp. 389-395.
31. Fel'dman V.R. Ideologiya v sotsial'no-istoricheskoy dinamike [Ideology in socio-historical dynamics] *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Filosofiya. Sociologiya. Politologiya*, 2012, vol. 4, no. 20 (1), pp. 107-113.

Анализ современных видов манипуляции сигнала беспроводных систем связи

Э. В. Прощенок, А. Ю. Родионов

В данной работе представлен обзор современных видов манипуляции сигнала, таких как иерархическая квадратурная амплитудная модуляция (HQAM), круговая квадратурная амплитудная модуляция (CQAM) и параметрическая квадратурная амплитудная модуляция (θ -QAM). Проведено моделирование вышеупомянутых видов модуляции и квадратурной амплитудной модуляции (QAM) с помощью языка программирования MATLAB. Для сравнения четырех выбранных видов модуляции используются два вида порядка модуляции: 16 и 64. Для оценки эффективности использования того или иного вида модуляции был смоделирован канал связи, в который были добавлены аддитивный белый гауссовский шум (АБГШ), доплеровские частотные искажения и неточная кадровая синхронизация.

Ключевые слова: модуляция, квадратурная амплитудная модуляция, иерархическая квадратурная амплитудная модуляция, круговая квадратурная амплитудная модуляция, параметрическая квадратурная амплитудная модуляция.

1. Введение

В наше время нельзя представить современный мир без систем связи, так как они стали неотъемлемой частью человеческого взаимодействия. Системы связи позволяют эффективно передавать информацию в аналоговой и цифровой формах, создавая подходящий тип модуляции или манипуляции, который необходим для того или иного случая в зависимости от требований к характеристикам сигнала.

В последнее время все большее распространение находят сигналы в цифровой форме, потому как они обладают рядом преимуществ в сравнении с аналоговыми сигналами: неограниченные возможности обработки сигнала; большая помехоустойчивость; лучшее распределение спектра; большая дальность связи; экономичность энергии при передаче; возможность кодирования информации; надежное и долгое хранение. Так как цифровая информация может разбиваться на кадры, пакеты, сегменты, то каждый из пакетов может наделяться своим собственным адресом, представленным в виде цифрового кода, и при этом все эти пакеты могут по-разному маршрутизироваться в зависимости от текущей загруженности каналов (благодаря этому возможна сеть Интернет, IP-телефония, создание виртуальных каналов между двумя и более пользователями).

Беспроводные технологии нашли свое широкое применение с конца 19 века и по сей день. В то время как проводные системы требуют развертки нередко дорогостоящих кабелей и планирования помещений с учетом их размещения внутри последних, а также проектирования передачи сигнала на дальнее расстояние с использованием не только кабелей, но и подвесов к ним, беспроводные технологии намного легче справляются с проблемой внедрения в окружающее пространство за счет передачи информации с помощью радиоволн, которые используют окружающее пространство как канал связи, что и является их основным преимуществом.

Однако стоит помнить и о том, какие сложности могут возникнуть с беспроводными технологиями. Необходимо учитывать электромагнитную совместимость таких систем, а также уровень излучения в окружающее пространство. Кроме этого, нужно очень тщательно планировать размещение беспроводных систем, так как на их работу оказывают существенное влияние различные препятствия в виде деревьев, зданий и стен, которые могут сделать распространение радиоволн затруднительным на высоких частотах.

Современные методы модуляции используются в различных системах сотовой связи, спутниковых системах, беспроводных локальных сетях, в телевизионных стандартах. Высокоуровневые методы модуляции широко используются в развивающихся стандартах Wi-Fi. Основное применение в современных системах связи находят такие виды модулирования сигналов, как: двоичная фазовая манипуляция (BPSK), квадратурная фазовая манипуляция (QPSK), квадратурная амплитудная модуляция (M-QAM) и другие. На основе этих типов модуляции были созданы передовые способы передачи сигнала, такие как HQAM (hierarchical QAM), CQAM (circular QAM), θ -QAM (параметрическая квадратурная амплитудная модуляция).

В данной работе будут рассмотрены современные методы манипуляции, наиболее часто используемые в системах связи, а также с помощью языка программирования MATLAB будет проведено моделирование некоторых видов манипуляций для сравнения их характеристик.

2. Теоретический раздел

2.1. Иерархическая модуляция

Иерархическая модуляция – это технический прием, позволяющий отдельно обрабатывать в одной полосе частот модуляции часть битов как QPSK при фактически используемой модуляции 16 QAM, 64 QAM и других. Назначение такой обработки состоит в том, чтобы получить более высокую помехоустойчивость при извлечении наиболее значимой части информации. Сущность иерархической модуляции заключается в таком выборе параметров сигнальных векторов, который приводит к образованию в цифровом потоке двух или более виртуальных каналов с разной скоростью передачи, помехозащищенностью и, соответственно, зоной обслуживания. Характеристики виртуальных каналов определяются различными комбинациями точек в сигнальном пространстве и различными скоростями кодирования.

При воздействии помех изменяются амплитуда и фаза сигналов. В результате изменяется значение сигнала – принятый сигнал отличается от переданного. Чем ниже отношение сигнал/шум, тем выше вероятность ошибок и выше вероятность перехода сигнала в другой квадрант.

В созвездии 64 QAM в пределах одного квадранта под действием помех меняются только младшие биты информации, а старшие остаются одинаковыми (рис. 1). Выделив два старших бита информации, получается созвездие, ничем не отличающееся от QPSK (рис. 2).

Иерархическая модуляция может быть однородной и неоднородной. В созвездии однородной иерархической модуляции расстояния между символами и от крайних символов до осей равны, в неоднородной их отношение α равно величине, которая может принимать значения 2 или 4 (рис. 3). Для однородной модуляции значение α всегда равно 1.

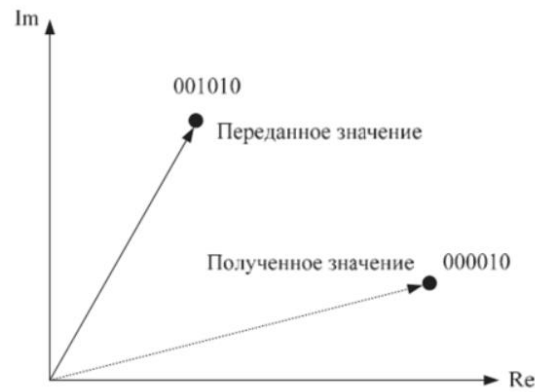


Рис. 1. Изменение значения сигнала под действием помех (64 QAM)

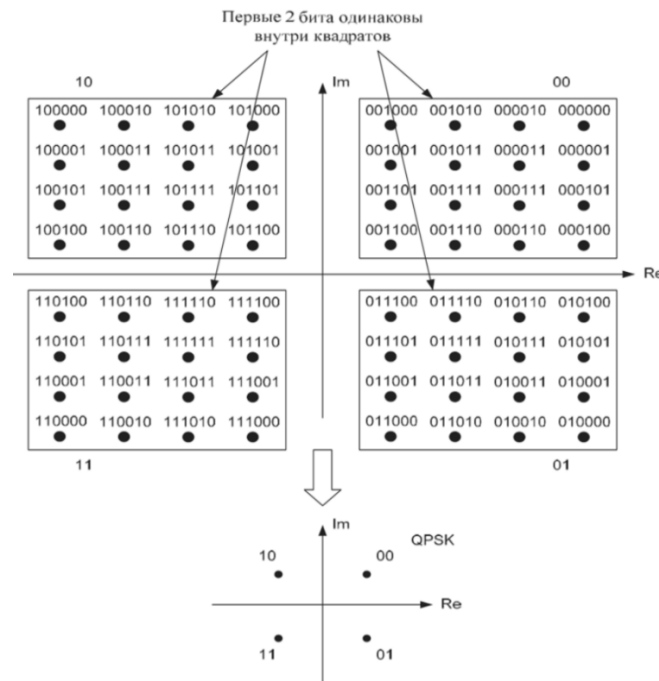
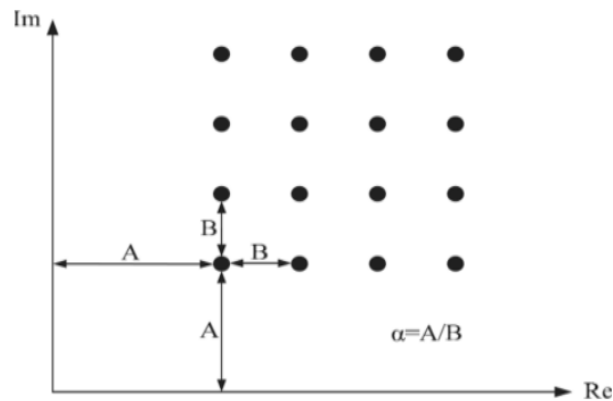


Рис. 2. Сочетание QPSK (снизу) и 64 QAM (сверху) в иерархической модуляции

Изменение α позволяет перераспределить надежность доставки (подверженность помехам) между потоками высокого и низкого приоритетов. Дело в том, что при увеличении α возрастает расстояние между точками созвездия разных квадрантов и уменьшается расстояние между точками созвездия одинаковых квадрантов. Поэтому при увеличении α увеличивается надежность доставки потока высокого приоритета и уменьшается низкого [1].

Рис. 3. Параметр α в иерархической модуляции

2.2. Круговая квадратурная амплитудная модуляция

Обычным квадратным группам QAM присущи характеристики, которые подразумевают значительные сложности при реализации CPE (Carrier Phase Estimation – оценка фазы несущей) в когерентных системах. Созвездия кругового QAM (CQAM) обеспечивают более высокую гибкость, поскольку они могут быть построены с произвольным распределением фазы сигнальных точек, количеством кругов амплитуды и количеством сигнальных точек в круге [3]. Характеристики CQAM могут быть оптимизированы и разработаны для повышения устойчивости как к фазовому, так и к аддитивному шуму [4, 6]. Такая гибкость позволяет исследовать оптимальные комбинации для различных сценариев, которые могут даже превзойти квадратную QAM. Кроме того, характеристики C-mQAM могут использоваться для реализации CPE в простом приемнике с прямой связью, который не требует дополнительных этапов для адаптации совокупности или сложной аппаратной реализации [4].

Построение созвездий C-mQAM можно проиллюстрировать на примере созвездия C-16QAM, которое имеет 16 (4/4/4/4) сигнальных точек, распределенных по 4 кругам амплитуды (в отличие от квадрата 16QAM, который имеет 4/8/4 сигнальных точек, распределенных в 3 круга амплитуды). Внутри каждого круга существует постоянное разделение фаз $\pi/2$ между символами, и каждый последующий круг вращается на $\pi/2$. Таким образом, C-16QAM имеет 16 сигнальных точек, распределенных по 8 возможным фазовым положениям и 4 уровням амплитуды, как показано на рис. 4 (а). Радиусы кругов амплитуды неоднородны, чтобы гарантировать, что расстояние между соседними сигнальными точками близко к минимальному расстоянию между сигнальными точками в самом маленьком круге. Поскольку для C-16QAM количество соседних сигнальных точек для данной сигнальной точки не равно или меньше количества битов на символ ($m = 4$), схема отображения Грея не может быть реализована, как для квадратного QAM [5]. Вместо этого для C-mQAM сигнальное созвездие формируется с точки в первом круге амплитуды с наименьшей фазой, равной 0. Последующее отображение назначается путем увеличения номера символа против часовой стрелки, а затем от круга наименьшей амплитуды до наибольшего, как показано на рис. 4а. Расположение точек на сигнальном созвездии для C-64QAM показано на рис. 4б.

В общем, круговые созвездия высокого порядка C-mQAM строятся с помощью простого набора правил [8, с. 22]:

1) Количество кругов в виде $N_k = 2^{(b/2)}$, где b – количество бит в символе, а $(b/2)$ – это переход к следующему целому числу.

2) Количество сигнальных точек созвездия на круг определяется как $N_p = 2^m / N_k$, где m – количество бит на символ.

3) Дополнительный фазовый сдвиг для четных кругов созвездий определяется как $\varphi_{\text{shift}} = \pi / N_p$.

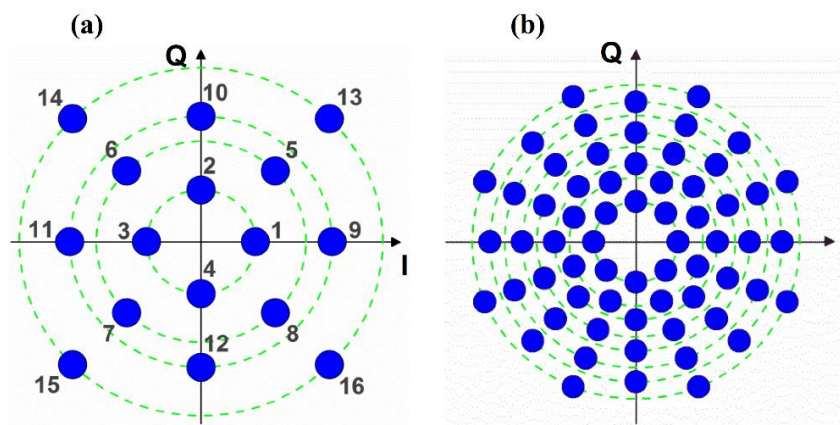


Рис. 4. Созвездия CQAM: (а) C-16QAM, (б) C-64QAM

2.3. Параметрическая квадратурная амплитудная модуляция

Семейство параметрической квадратурной амплитудной модуляции (QAM), называемое θ -QAM, которое включает в себя другие известные созвездия, такие как квадратный QAM (SQAM) и треугольный QAM (TQAM), как частные случаи. Универсальная структура θ -группировки сигналов QAM, возникающая из-за изменения угла между сигнальными точками, приводит к достижению минимума частоты ошибок битов (BER) при ограничении средней мощности.

По итогам работы [2] было установлено, что оптимальные созвездия образуют решетку почти равносторонних треугольников, которые обеспечивают улучшение SNR на 0,5 дБ по сравнению с обычными форматами созвездий QAM, учитывая каналы аддитивного белого гауссовского шума (далее – АБГШ).

Теоретическое исследование направлено на обеспечение понимания компромисса между сложностью и производительностью по каналам АБГШ и замираниями этой схемы параметрической модуляции, которая включает практические случаи TQAM и SQAM как особые случаи.

Для начала рассматривается констелляция M-SQAM, где двоичные данные отображаются при помощи двух координат (x_m, y_n) , каждая из которых образует переданный символ $s_{m,n}$ и полностью M векторов символов s_p , где $p = 1, \dots, M$; $M = 4 \cdot k$; $k \in \mathbb{Z} + i \{m, n\} \in [1, \dots, \sqrt{M}]$.

Структура созвездия проиллюстрирована на рис. 5, на котором $M = 16$. Символы SQAM размещаются по углам квадратов со стороной $2d$. Таким образом, евклидово расстояние между любыми двумя соседними символами равно $2d$, где d зависит от порядка модуляции M и изменяется соответствующим образом, так что общая средняя энергия созвездия остается равной E_{av} .

В созвездиях семейства θ -QAM расстояния между символами следующие:

$$D(s_{m,n}, s_{m,n+1}) = 2d, n = 1, \dots, \sqrt{M} - 1, \quad (1)$$

$$D(s_{m,n}, s_{m+1,n}) = 2d, m = 1, \dots, \sqrt{M} - 1. \quad (2)$$

Однако символы лежат не по краям квадрата, а по углам равнобедренных треугольников; симметрия созвездия относительно точки $(0, 0)$ сохраняется (рис. 5). Неравномерный угол θ этих равнобедренных треугольников влияет на евклидово расстояние несмежных символов, как показано на рис. 9, где символы θ -QAM изображены для различных значений угла θ (символы созвездия TQAM показаны как треугольники).

Практически этот угол влияет на значение полной средней энергии на символ E_{av} .

Координаты символов $s_{m,n}$ созвездия θ -QAM, в котором $M = 16$, могут быть получены после некоторых простых тригонометрических вычислений, как показано на рис. 8.

Наконец, координаты x_m, y_n символа $s_{m,n}$ M -ого созвездия θ -QAM задаются следующим образом:

$$(x_m, y_n) = \left(\left[2 \cdot (n-1) + 1 - \sqrt{M} \right] \cdot d + \left[2 \bmod(m, 2) - 1 \right] \cdot \frac{a}{2} - \left[2 \cdot (m-1) + 1 - \sqrt{M} \right] \cdot \frac{b}{2} \right), \quad (3)$$

где $n = 1, \dots, \sqrt{M}$; $m = 1, \dots, \sqrt{M}$; $\bmod(\cdot)$ обозначает модуль после деления; $2d$ – евклидово расстояние между соседними сигнальными точками; $a = 2d \cos \theta$; $b = 2d \sin \theta$.

Также стоит отметить, что с теоретической точки зрения угол θ может принимать значения внутри интервала $(0, \pi)$, но из-за симметрии учитываются только углы, меньшие, чем $\pi/2$.

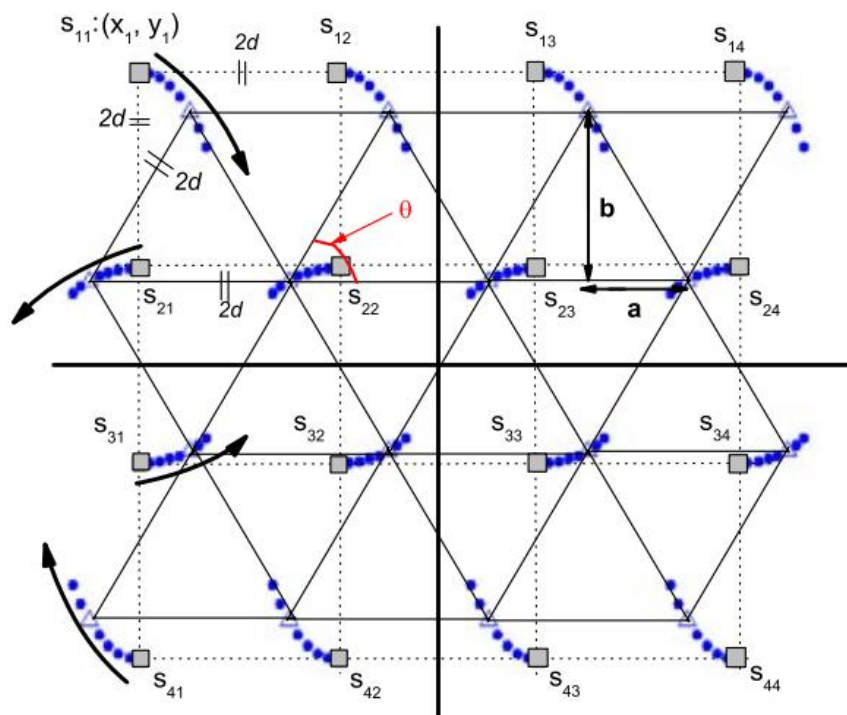


Рис. 5. Структура созвездия θ -QAM. Сигнальные точки SQAM изображаются в виде квадратов, а символы TQAM – в виде треугольников, вершины одного из треугольников s_{21} , s_{22} и s_{31} .

3. Разработка математической модели

Цель моделирования заключается в экспериментальной оценке исследуемых видов манипуляции. Также необходимо изучить, какие характеристики сигналов, использующих разные виды манипуляций, будут получены в канале, приближенном к реальному, и сравнить их с теоретическими сведениями.

Задачи моделирования:

1. Создать созвездия исследуемых типов модуляции.

На данном этапе необходимо создать созвездия, соответствующие рассматриваемым видам модуляции для дальнейшего изучения их характеристик. В качестве программной среды разработки модели служит MATLAB, а именно код, который моделирует сигнал в канале.

2. Разработать модель канала связи с АБГШ и различными искажениями сигнала.

Для исследования трёх выбранных видов манипуляции необходимо создать такие условия передачи сигнала, которые будут отличаться от идеальных. Например, будут использованы такие мешающие факторы успешной передачи сигнала, как АБГШ, доплеровское смещение и неточная кадровая синхронизация.

3. Провести моделирование.

4. Выполнить анализ результатов.

Для начала моделирования необходимо создать исследуемые типы модуляции.

Для сравнения строится созвездие QAM. В эксперименте будут использованы два уровня модуляции: 16 и 64.

3.1. Квадратурная амплитудная модуляция

При моделировании в качестве опорной точки будет использовано стандартное созвездие QAM. Сигнальное созвездие 16 и 64 QAM было приведено в разделе 2. Код для формирования созвездий 16 QAM и 64 QAM доступен по ссылке [6].

3.2. Иерархическая квадратурная амплитудная модуляция

Иерархическая квадратурная амплитудная модуляция создается на основе обычной QAM. Особенность заключается в расположении точек на созвездии рядом с условными осями фазы и квадратуры. Сигнальное созвездие 16 HQAM было приведено в разделе 2. Код для формирования созвездий 16 HQAM и 64 HQAM доступен по ссылке [7].

3.3. Круговая квадратурная амплитудная модуляция

Круговая квадратурная амплитудная модуляция имеет особенности при построении. Для начала строится базовое созвездие QPSK, которое располагается на первой окружности, радиус которой равен 1. Оно имеет расположение на осях, а не между ними в квадрантах. Следующие четыре точки второй окружности сдвинуты относительно точек первой на 45 градусов. В первой окружности минимальное расстояние между точками (между точками 2 и 3) равняется 1.41 (рис. 6). Эта же величина задается как минимальное расстояние между точками первой и второй окружности (расстояние между точками 1 и 4). Для того, чтобы найти расстояние между началом координат и точкой 4, необходимо воспользоваться теоремой косинусов.

Теорема 1. Квадрат стороны треугольника равен сумме квадратов двух других сторон минус удвоенное произведение этих сторон на косинус угла между ними:

$$a^2 = b^2 + c^2 - 2 \cdot b \cdot c \cdot \cos \alpha,$$

где a – расстояние от точки 1 до точки 4; b – расстояние от начала координат до точки 1; c – искомое расстояние; $\alpha = 45^\circ$.

По теореме 1 расстояние между точкой 0 и 4:

$$c^2 - 2 \cdot b \cdot c \cdot \cos \alpha + (b^2 - a^2) = 0.$$

Данное выражение имеет вид квадратного уравнения. Тогда значение c будет определяться как:

$$c = \frac{2 \cdot b \cdot \cos \alpha + \sqrt{(-2 \cdot b \cdot \cos \alpha)^2 - 4 \cdot (b^2 - a^2)}}{2}.$$

$$c = \frac{2 \cdot 1 \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + \sqrt{\left(-2 \cdot 1 \cdot \frac{\sqrt{2}}{2}\right)^2 - 4 \cdot (1^2 - 1.41^2)}}{2} = 1.93.$$

Для нахождения точек третьей окружности необходимо воспользоваться двумя вспомогательными окружностями, центрами которых являются любые две точки первой окружности. Точки третьей окружности располагаются также на координатных осях фазы и квадратуры, что и точки первой окружности. На пересечении вспомогательных окружностей и осей координат будут располагаться точки третьей окружности. В итоге получается, что расстояние между второй окружностью и третьей меньше, чем между первой и второй, и минимальное расстояние между точками второй окружности и третьей равно 1.72. Четвертая окружность удалена от третьей на такое же расстояние, что и вторая от первой. Следующие окружности

при более высоком уровне модуляции будут иметь равные расстояния между собой: расстояние между первой окружностью и второй равно расстоянию между второй и третьей и равно расстоянию между третьей и четвертой и т.д.

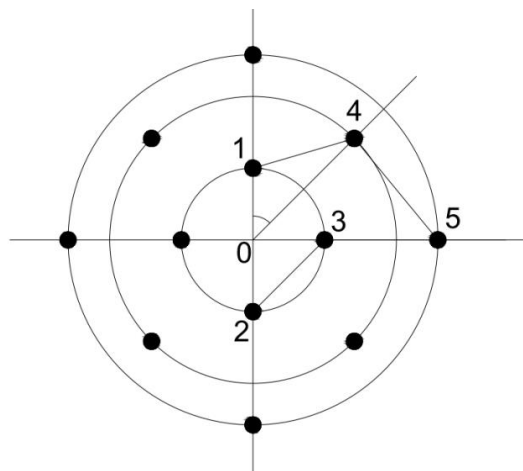


Рис. 6. Определение расположения точек на сигнальном созвездии для CQAM

Код для формирования созвездий 16 CQAM и 64 CQAM доступен по ссылке [8].

3.4. Параметрическая квадратурная амплитудная модуляция

Параметрическая квадратурная амплитудная модуляция так же, как и иерархическая, строится на основе созвездия QAM. Однако её особенность состоит в том, что расстояние между любыми точками одинаково и задаётся равным 1.15. Такое значение выбирается с той целью, чтобы площади сигнальных созвездий определенных уровней модуляции были примерно равны. В эксперименте за основу расположения точек на сигнальном созвездии берется не квадрат, как в QAM, а равносторонний треугольник. Код для формирования созвездий 16 PQAM и 64 PQAM доступен по ссылке [9].

4. Структура модели и обработка результатов

4.1. Принципы работы модели

С помощью программного языка MATLAB формируется модель, структурная схема которой приведена на рис. 7 и 8. Код для получения модели доступен по ссылке [10].

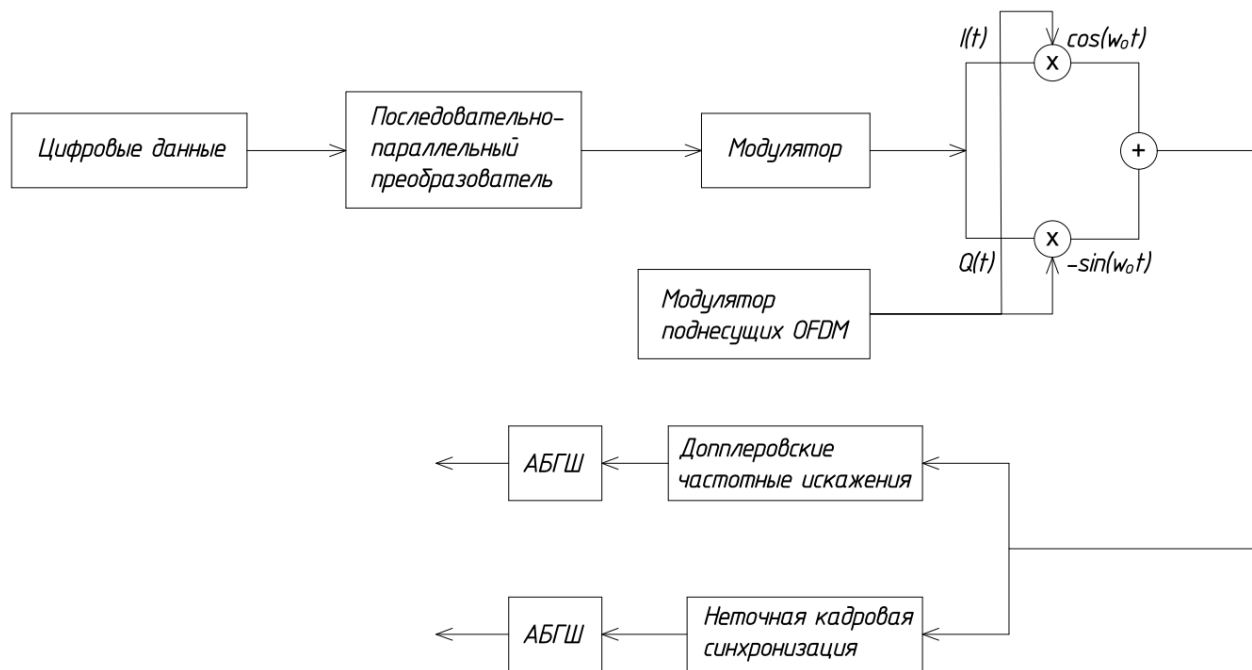


Рис. 7. Структура модели для модуляции сигнала

Ниже представлено описание схемы на рис. 7.

Формирование двоичной последовательности для передачи.

На данном этапе формируется случайная двоичная последовательность длиной 153 600 символов.

Преобразование двоичной последовательности в вид, пригодный для использования поднесущих OFDM.

Исходный сигнал необходимо распределить между поднесущими OFDM с помощью последовательно-параллельного преобразователя. Кроме этого, двоичный сигнал преобразуется в десятичный для простоты работы в MATLAB.

Формирование поднесущих OFDM.

В рамках моделирования вышеперечисленные виды манипуляции будут использоваться для модуляции поднесущих OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) в количестве 800 штук со следующими параметрами:

- центральная частота: 14 кГц;
- полоса частот для всех поднесущих: 8 кГц;
- защитный частотный интервал: 10 Гц, причем $T_s = 0.1$ с;
- частота дискретизации сигнала: 192 кГц;
- спектр сигнала: 10–18 кГц.

Квадратурная модуляция поднесущих.

Каждая поднесущая модулируется по обычной схеме модуляции (квадратурная амплитудная модуляция) на низкой символьной скорости, сохраняя общую скорость передачи данных, как и у обычных схем модуляции одной несущей в той же полосе пропускания. На практике сигналы OFDM получают применением обратного БПФ (быстрое преобразование Фурье).

Формирование сигнала OFDM.

OFDM-сигнал формируется N гармоническими поднесущими, которые разнесены по частоте на равные интервалы Δf (эквидистантное размещение поднесущих). При таком размещении частот занимаемая OFDM-сигналом полная полоса частот ΔF делится на N подканалов, ширина которых $\Delta f = 1/T_s$, где T_s – длительность сигнальной выборки, над которой выполняется операция БПФ (символьный интервал).

а) Создание доплеровских частотных искажений.

В реальном канале возможен случай, когда приемник и/или передатчик находится в движении, поэтому необходимо рассмотреть влияние эффекта Доплера.

Частота, регистрируемая приёмником, в общем случае (для подвижного и неподвижного приёмника и неподвижного источника) определяется по формуле:

$$\omega = \omega_0 \cdot \left(1 + \frac{u}{c}\right), \quad (4)$$

где ω_0 – угловая частота, с которой источник испускает волны, рад/с; u – скорость приёмника относительно среды (положительная, если он движется по направлению к источнику), м/с; c – скорость распространения волн в среде, м/с.

По формуле (4) определяется частота, регистрируемая приёмником:

$$2 \cdot \pi \cdot f_d = 2 \cdot \pi \cdot 14 \cdot 10^3 \cdot \left(1 + \frac{1.5}{335}\right);$$

$$f_d = 14060 \text{ Гц.}$$

Код для добавления доплеровских частотных искажений доступен по ссылке [11].

б) Моделирование неточной кадровой синхронизации.

Кадровая (групповая) синхронизация необходима в системах передачи информации с частотным уплотнением каналов, она отвечает за корректное определение начала принятого OFDM-символа. При её отсутствии происходит потеря части информации, передаваемой в канале, в начале или в конце сигнала. Код для добавления неточной кадровой синхронизации доступен по ссылке [12].

Моделирование АБГШ.

Последним этапом формирования итогового промодулированного сигнала является добавление к нему АБГШ, причем происходит это отдельно для сигнала, подверженного доплеровскому искажению, и для сигнала, подверженного неточной кадровой синхронизации.

Квадратурная демодуляция.

Данный этап подразумевает произведение демодуляции промодулированного ранее сигнала.

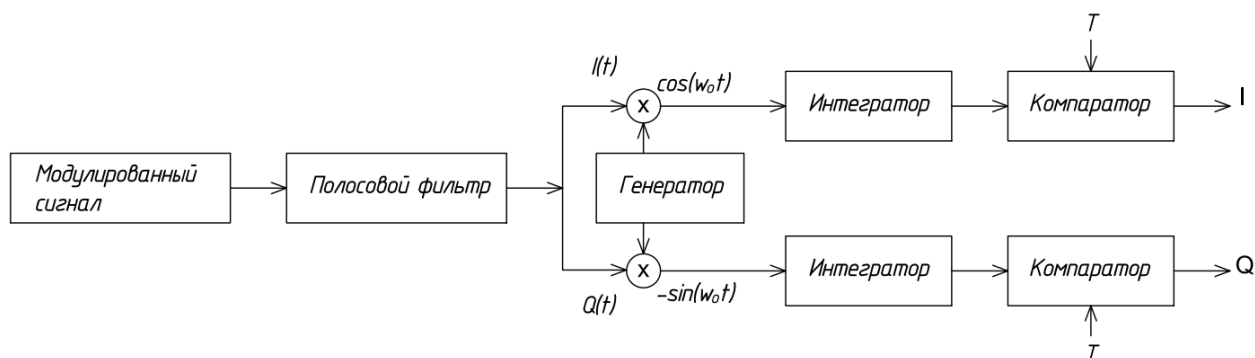


Рис. 8. Структура модели для демодуляции сигнала

Расчет BER и SNR.

Важными показателями качества передаваемого сигнала являются такие параметры, как BER и SNR.

Величина SNR определяется по формуле:

$$\text{SNR} = 10 \cdot \log \left(\frac{P_c}{P_{\text{ш}}} \right) = 20 \cdot \log \left(\frac{A_c}{A_{\text{ш}}} \right), \quad (5)$$

где P_c – мощность сигнала, Вт; $P_{ш}$ – мощность шума, Вт; A_c – амплитуда сигнала, В; $A_{ш}$ – амплитуда шума, В.

В коде модели из пункта 4.1 в цикле z выбирается множитель для амплитуды шума из векторов NoiseMagnitude.

Величина BER определяется по формуле (6):

$$BER = \frac{\Sigma xor(x, y)}{N_x}, \quad (6)$$

где x – исходные данные; y – принятые данные; N_x – количество бит исходных данных.

4.2. Моделирование и обработка результатов

Для трёх рассматриваемых видов манипуляции строятся зависимости BER от SNR (рис. 9, 10), причём сравниваться будут между собой манипуляции одного уровня.

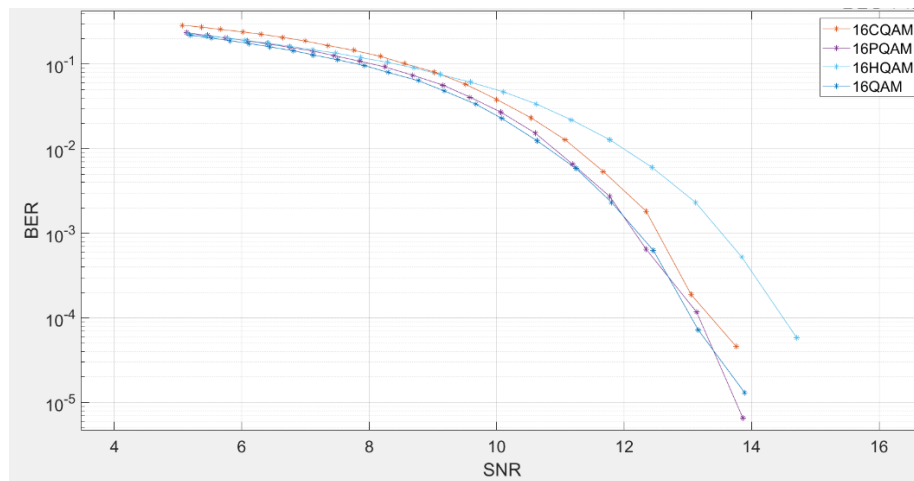


Рис. 9. Зависимость BER от SNR для манипуляций 16 CQAM, 16 PQAM, 16 HQAM и 16 QAM

Из рис. 9 видно, что при одинаковом значении SNR, например, 12 дБ, иерархическая модуляция показывает худший показатель BER (10^{-2}), в то время как 16 CQAM имеет $10^{-2.5}$. Причем для 16 QAM и 16 PQAM показатели практически одинаковы и равны почти 10^{-3} .

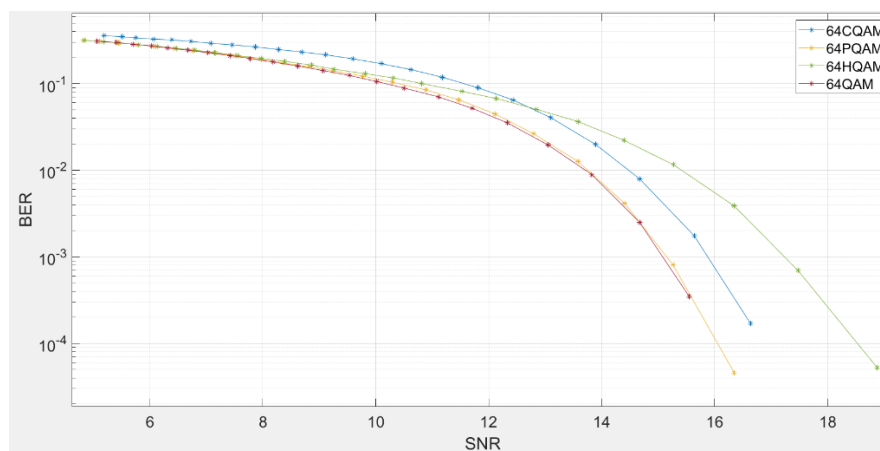


Рис. 10. Зависимость BER от SNR для манипуляций 64 CQAM, 64 PQAM, 64 HQAM и 64 QAM

Анализируя рис. 10, можно сказать, что тенденция расположения кривых на графике зависимости BER от SNR сохраняется. При SNR, равном 14 дБ, значения BER для 64 QAM и 64

PQAM похожи и равны примерно 10^{-2} . При SNR, равном 12.7 дБ, манипуляция 64 CQAM начинает давать лучший показатель BER по сравнению с 64 HQAM. Также после значения SNR, равного 12.7 дБ, иерархическая модуляция даёт худший из всех показателей BER.

Также строятся графики зависимости BER от SNR для CQAM, PQAM, HQAM и QAM при доплеровских искажениях, где рассматриваются 16-уровневые и 64-уровневые манипуляции (рис. 11, 12).

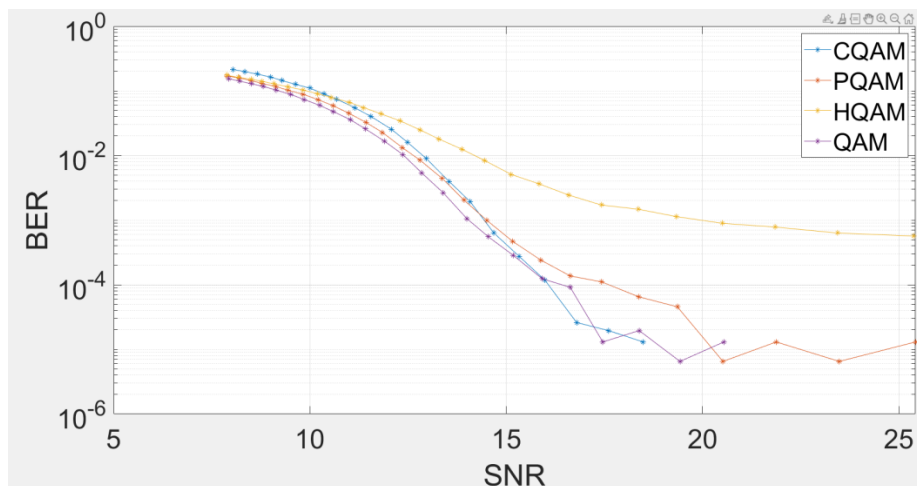


Рис. 11. Зависимость BER от SNR для манипуляций 16 CQAM, 16 PQAM, 16 HQAM и 16 QAM при доплеровских искажениях

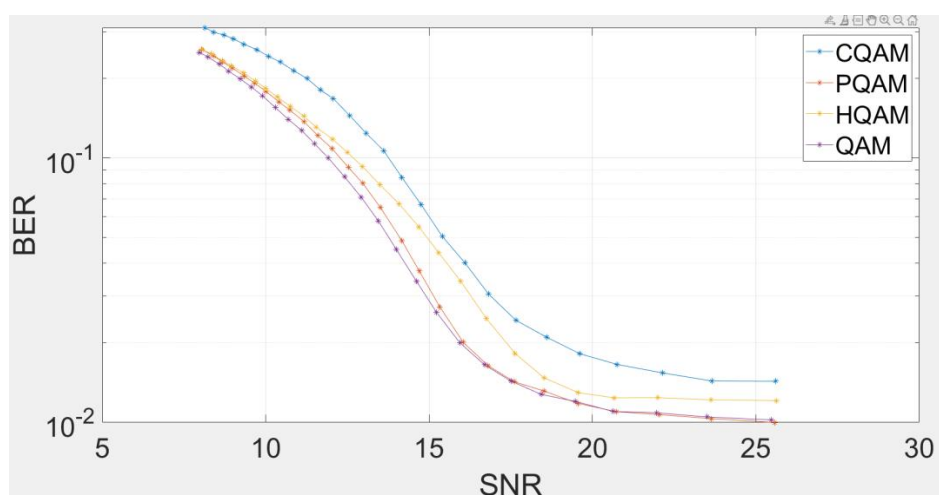


Рис. 12. Зависимость BER от SNR для манипуляций 64 CQAM, 64 PQAM, 64 HQAM и 64 QAM при доплеровских искажениях

Из рис. 11 видно, что при значении SNR, равном 15 дБ, кривые зависимости для 16 CQAM, 16 PQAM и 16 QAM перестают носить линейный характер и имеют BER, равный примерно 10^{-3} . Кроме этого, после значения SNR, равного 15 дБ, эти три вида манипуляции дают лучшие показатели BER среди всех результатов. Также по графику видно, что 16 HQAM плохо справляется с доплеровскими искажениями и для этого случая потребуются методы фазо-частотной коррекции.

Кривые, представленные на рис. 12, показывают, что 64-позиционные виды манипуляций дают большие результаты по значениям BER (10^{-2}) вплоть до SNR, равного 25 дБ, при доплеровских искажениях. В этом случае также понадобятся методы фазо-частотной коррекции.

Наличие таких результатов говорит об уязвимости промодулированного OFDM-сигнала к эффекту Доплера.

Помимо этого, строятся графики зависимости BER от SNR для CQAM, PQAM, HQAM и QAM при неточной кадровой синхронизации, где рассматриваются 16-уровневые и 64-уровневые манипуляции (рис. 13, 14).

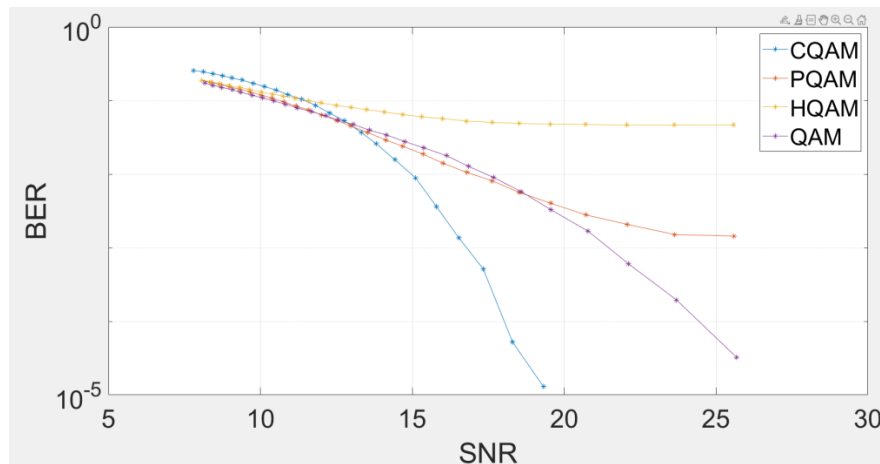


Рис. 13. Зависимость BER от SNR для манипуляций 16 CQAM, 16 PQAM, 16 HQAM и 16 QAM при неточной кадровой синхронизации

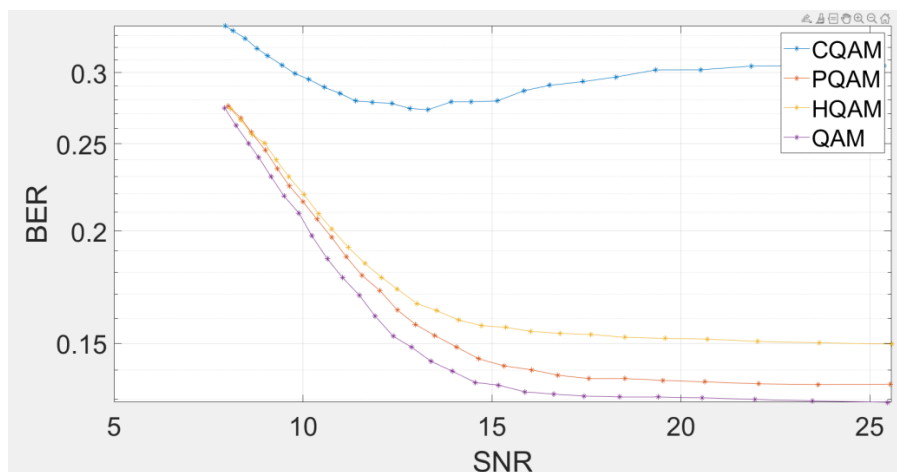


Рис. 14. Зависимость BER от SNR для манипуляций 64 CQAM, 64 PQAM, 64 HQAM и 64 QAM при неточной кадровой синхронизации

График зависимости на рис. 13 говорит о том, что 16 CQAM очень устойчива к ошибкам при кадровой синхронизации и даёт лучший показатель BER среди четырёх построенных зависимостей, в то время как 16 PQAM не даёт значение BER меньше, чем 10^{-3} , а 16 HQAM – меньше, чем 10^{-2} . Манипуляция 16 QAM справляется лучше с такой проблемой, чем 16 PQAM и 16 HQAM и даёт результат по BER меньше, чем 10^{-4} .

Данные на рис. 14 свидетельствуют о том, что применение 64-позиционных схем манипуляции в составе OFDM без использования более современных методов синхронизации сигнала невозможно. Особенно плохие результаты даёт 64 CQAM, так как значение BER для неё не меньше, чем 0.25.

Литература

1. Лузин В. И., Никитин Н. П., Гадзиковский В. И. Основы формирования, передачи и приема цифровой информации: учебное пособие. М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2014. 316 с.
2. Фоскини Г., Гитлин Р., Вайнштейн С. Оптимизация двумерных сигнальных созвездий в присутствии гауссового шума [Электронный ресурс]. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1092061> (дата обращения: 06.06.2021).
3. Вонтергем Дж.В., Бутрос Дж.Дж., Моенеклей М. Построение круговых квадратурных амплитудных модуляций (CQAM) [Электронный ресурс]. URL: <https://biblio.ugent.be/publication/8604053/file/8604054.pdf> (дата обращения: 01.06.2021)
4. Чжэн Б., Дэн Л., Савахаши М., Камия Н. Циркулярная группировка QAM высокого порядка с высокой скоростью кодирования LDPC для каналов фазового шума [Электронный ресурс]. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8301807> (дата обращения: 23.05.2021).
5. Чжэн Б., Дэн Л., Савахаши М., Камия Н. Характеристики оценки и компенсации фазового шума с помощью пилот-символов и ФАПЧ для циклической QAM высокого порядка [Электронный ресурс]. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8303987> (дата обращения: 29.05.2021).
6. Код для формирования созвездий 16 QAM и 64 QAM [Электронный ресурс]. URL: <https://github.com/EllaProshchenok/Research-CQAM-HQAM-PQAM-and-QAM-types-of-modulation/blob/main/QAM-constellation.m>
7. Код для формирования созвездий 16 HQAM и 64 HQAM [Электронный ресурс]. URL: <https://github.com/EllaProshchenok/Research-CQAM-HQAM-PQAM-and-QAM-types-of-modulation/blob/main/HQAM-constellation.m>
8. Код для формирования созвездий 16 CQAM и 64 CQAM [Электронный ресурс]. URL: <https://github.com/EllaProshchenok/Research-CQAM-HQAM-PQAM-and-QAM-types-of-modulation/blob/main/CQAM-constellation.m>
9. Код для формирования созвездий 16 PQAM и 64 PQAM [Электронный ресурс]. URL: <https://github.com/EllaProshchenok/Research-CQAM-HQAM-PQAM-and-QAM-types-of-modulation/blob/main/PQAM-constellation.m>
10. Код для получения модели [Электронный ресурс]. URL: <https://github.com/EllaProshchenok/Research-CQAM-HQAM-PQAM-and-QAM-types-of-modulation/blob/main/main.m>
11. Код для добавления доплеровских частотных искажений [Электронный ресурс]. URL: <https://github.com/EllaProshchenok/Research-CQAM-HQAM-PQAM-and-QAM-types-of-modulation/blob/main/Doppler.m>
12. Код для добавления неточной кадровой синхронизации [Электронный ресурс]. URL: <https://github.com/EllaProshchenok/Research-CQAM-HQAM-PQAM-and-QAM-types-of-modulation/blob/main/Frame.m>

Статья поступила в редакцию 10.03.2022;
переработанный вариант – 20.10.2022.

Прощенок Элла Витальевна

студентка департамента электроники, телекоммуникаций и приборостроения ДВФУ,
e-mail: proshchenok.ev@students.dvfu.ru.

Родионов Александр Юрьевич

к.ф.-м.н., доцент департамента электроники, телекоммуникаций и приборостроения ДВФУ (690922, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10) тел. 8 (423) 265-24-29, e-mail: rodionov.ayur@dvfu.ru.

Modern types of signal manipulation analysis of wireless communication systems**Ella V. Proshchenok**

student of the Department of Electronics, Telecommunications and Instrument Engineering, Far Eastern Federal University (FEFU, Vladivostok, Russia), proshchenok.ev@students.dvfu.ru.

Alexander Yu. Rodionov

candidate of Physical and Mathematical Sciences of the Department of Electronics, Telecommunications and Instrument Engineering, Far Eastern Federal University (FEFU, Vladivostok, Russia), rodionov.ayur@dvfu.ru.

This paper presents an overview of modern types of signal manipulation such as hierarchical quadrature amplitude modulation (HQAM), circular quadrature amplitude modulation (CQAM) and parametric quadrature amplitude modulation (θ -QAM). Then follows the modeling of the above-mentioned types of modulations and quadrature amplitude modulation (QAM) using the MATLAB programming language. To compare the four selected types of modulation two types of modulation order are used: 16 and 64. To evaluate the effectiveness of using one or another type of modulation a communication channel was modeled to which additive white Gaussian noise (AWGN), Doppler frequency distortion and inaccurate frame synchronization were added.

Keywords: modulation, quadrature amplitude modulation, hierarchical quadrature amplitude modulation, circular quadrature amplitude modulation, parametric quadrature amplitude modulation.

References

1. Luzin, V.I., Nikitin N.P., Gadzikovsky V.I. *Osnovy formirovaniya, peredachi i priyema tsifrovoy informatsii* [Fundamentals of the formation, transmission, and reception of digital information]. Moscow: SOLON-PRESS, 2014. 316 p.
2. Foschini G., Gitlin R., Weinstein S. Optimization of twodimensional signal constellations in the presence of gaussian noise. *IEEE Trans. Commun.*, vol. 22, Jan. 1974, available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1092061> (accessed: 06.06.2021).
3. Wonterghem J.V., Boutros J. J., Moeneclaey M. Construction of Circular Quadrature Amplitude Modulations (CQAM). *IEEE International Conference on the Science of Electrical Engineering in Israel (ICSEE)*, 2018, available at: <https://biblio.ugent.be/publication/8604053/file/8604054.pdf> (accessed: 01.06.2021).
4. Zheng B., Deng L., Sawahashi M., Kamiya N. High-order circular QAM constellation with high LDPC coding rate for phase noise channels. *20th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC)*, 2017, available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8301807> (accessed: 23.05.2021).
5. Zheng B., Deng L., Sawahashi M., Kamiya N. Performance of pilot symbol assisted and PLL phase noise estimation and compensation for high-order circular QAM. *23rd Asia-Pacific Conference on Communications (APCC)*, 2017, available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8303987> (accessed: 29.05.2021).

6. Code for the formation of constellations 16 QAM and 64 QAM, available at: <https://github.com/EllaProshchenok/Research-CQAM-HQAM-PQAM-and-QAM-types-of-modulation/blob/main/QAM-constellation.m>
7. Code for constellation formation 16 HQAM and 64 HQAM, available at: <https://github.com/EllaProshchenok/Research-CQAM-HQAM-PQAM-and-QAM-types-of-modulation/blob/main/HQAM-constellation.m>
8. Code for constellation formation 16 CQAM and 64 CQAM, available at: <https://github.com/EllaProshchenok/Research-CQAM-HQAM-PQAM-and-QAM-types-of-modulation/blob/main/CQAM-constellation.m>
9. Code for constellation formation 16 PQAM and 64 PQAM, available at: <https://github.com/EllaProshchenok/Research-CQAM-HQAM-PQAM-and-QAM-types-of-modulation/blob/main/PQAM-constellation.m>
10. Code to get the model, available at: <https://github.com/EllaProshchenok/Research-CQAM-HQAM-PQAM-and-QAM-types-of-modulation/blob/main/main.m>
11. Code for adding Doppler frequency distortion, available at: <https://github.com/EllaProshchenok/Research-CQAM-HQAM-PQAM-and-QAM-types-of-modulation/blob/main/Doppler.m>
12. Code for adding inaccurate frame synchronization available at: <https://github.com/EllaProshchenok/Research-CQAM-HQAM-PQAM-and-QAM-types-of-modulation/blob/main/Frame.m>

Концепция формирования среды для продвижения инновационных разработок, созданных в высших учебных заведениях

М. Г. Шалыгин, Г. Н. Макаров

На основании тенденции развития российского высшего образования и инновационного развития Российской Федерации предложена концепция оценки инновационного потенциала разработок профессорско-преподавательского и научного состава высших учебных заведений. Описаны функции и подразделения офиса создания и сопровождения инноваций, а также схема взаимодействия офиса с центрами региональной поддержки малого бизнеса и акселерационными программами субъектов федерации. Подробно описаны действия информационно-аналитического центра по процессу экспертизы инновации, созданной в высшем учебном заведении в процессе интеллектуальной или хозяйственной деятельности, и центра сопровождения и поддержки инноваций по процессу коммерциализации результатов интеллектуальной деятельности путем создания малых инновационных предприятий, совместных предприятий или продажи объекта интеллектуальной деятельности. Дано подробное описание двух направлений развития при экспертизе инновации, включающие финансовый анализ инновации, анализ на технологичность и коммерциализуемость. Приведены рекомендации по организации процессов экспертизы и коммерциализации инноваций.

Ключевые слова: инновация, РИД, МИП, коммерциализация, управление.

1. Введение

В настоящее время в России проводится комплекс различных мероприятий, направленных на инновационное развитие регионов. Президентом Российской Федерации поставлена задача по развитию малого предпринимательства в инновационной сфере [1]. Идут поисковые исследования в формировании подходов к повышению эффективности управления инновационной деятельностью в высших учебных заведениях [2], которые показывают, что одной из основных проблем во внедрении инноваций являются выделение из общего перечня перспективных инновационных разработок и поиск процессов доведения инновации до практической реализации [3, 4]. Предлагаются методики оценки стоимости малого инновационного предприятия на основе метода Гудвилла [5], анализируется зарубежный опыт поддержки инноваций [6] и даются рекомендации высшим учебным заведениям.

2. Постановка задачи

Цель исследования заключается в установлении взаимосвязи между структурными подразделениями высшего учебного заведения на основе процессного подхода с целью выявления и реализации наиболее перспективных разработок сотрудников, имеющих потенциал к практической реализации.

Основная цель создания офиса – активизация инновационной деятельности университета и кооперация действий образовательных учреждений, правительства региона и предприятий реального сектора экономики в создании высокотехнологичного, конкурентного продукта.

Основная стратегическая цель создания офиса – улучшение научно-производственной инфраструктуры в регионе, создание высокооплачиваемых рабочих мест, увеличение числа внедренных результатов интеллектуальной собственности и обеспечение повышения качества жизни людей. В конечном итоге реализация предлагаемой политики приведет к обеспечению единства производственных, исследовательских и образовательных стандартов.

Таким образом, создание при вузах офиса сопровождения и продвижения инноваций соответствует целям государственной политики в области развития малого и среднего инновационного предпринимательства.

3. Структура инновационного центра

Для достижения поставленной цели необходима кооперация нескольких подразделений университета, включая патентный отдел, инжиниринговый центр, бизнес-инкубатор, кафедры и др. Это осуществимо путем создания структурных подразделений офиса, которые, кроме выполнения своих основных функций, будут отвечать за кооперацию со структурными подразделениями вуза. В качестве основных структурных подразделений офиса предлагается создать (рис. 1):

- информационно-аналитический центр (ЦИА);
- центр сопровождения и поддержки (ЦСП).

Основной целью работы информационно-аналитического центра является проведение анализа на соответствие критерию «инновация». В качестве рабочих органов ЦИА будут созданы центры:

- мониторинга и анализа инновационной потребности промышленного сектора рынка и инновационной деятельности сотрудников (рис. 2). Задачей центра является взаимодействие с реальным сектором экономики региона, мониторинг потребностей промышленного сектора в области технологических и технических инноваций, осуществление процесса экспертизы результатов интеллектуальной деятельности сотрудников и студентов университета с целью предложения объектов интеллектуальной деятельности существующим игрокам рынка, а также проведение переговоров по внедрению объектов интеллектуальной собственности или созданию совместных инновационных предприятий с организациями региона. Кроме того, в задачи центра входит формирование баз данных о потребностях промышленного сектора в технологических инновациях и данных об интеллектуальной деятельности сотрудников университета;

- экспертизы инноваций и финансового анализа. Задачей центра является анализ инновационных объектов, переданных из центра мониторинга, на инновационность, технологичность, финансовую состоятельность (рис. 3).

Целью работы центра сопровождения и поддержки является осуществление сопровождения инновации от регистрации объекта интеллектуальной деятельности до продажи готового продукта (рис. 4). В качестве структурных подразделений ЦСП предусмотрены:

- сектор финансовой и юридической поддержки. Сектор отвечает за регистрацию малого инновационного предприятия и бухгалтерское сопровождение до момента самоокупаемости или на срок не более 3 лет;

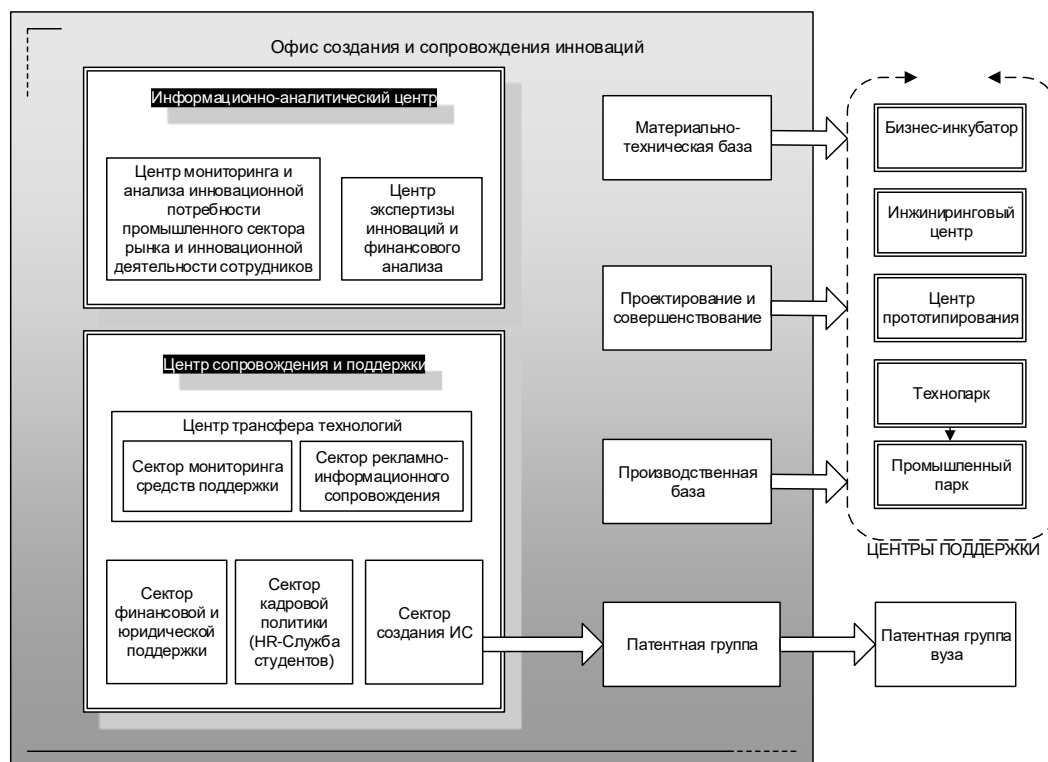


Рис. 1. Концепция структуры офиса инноваций

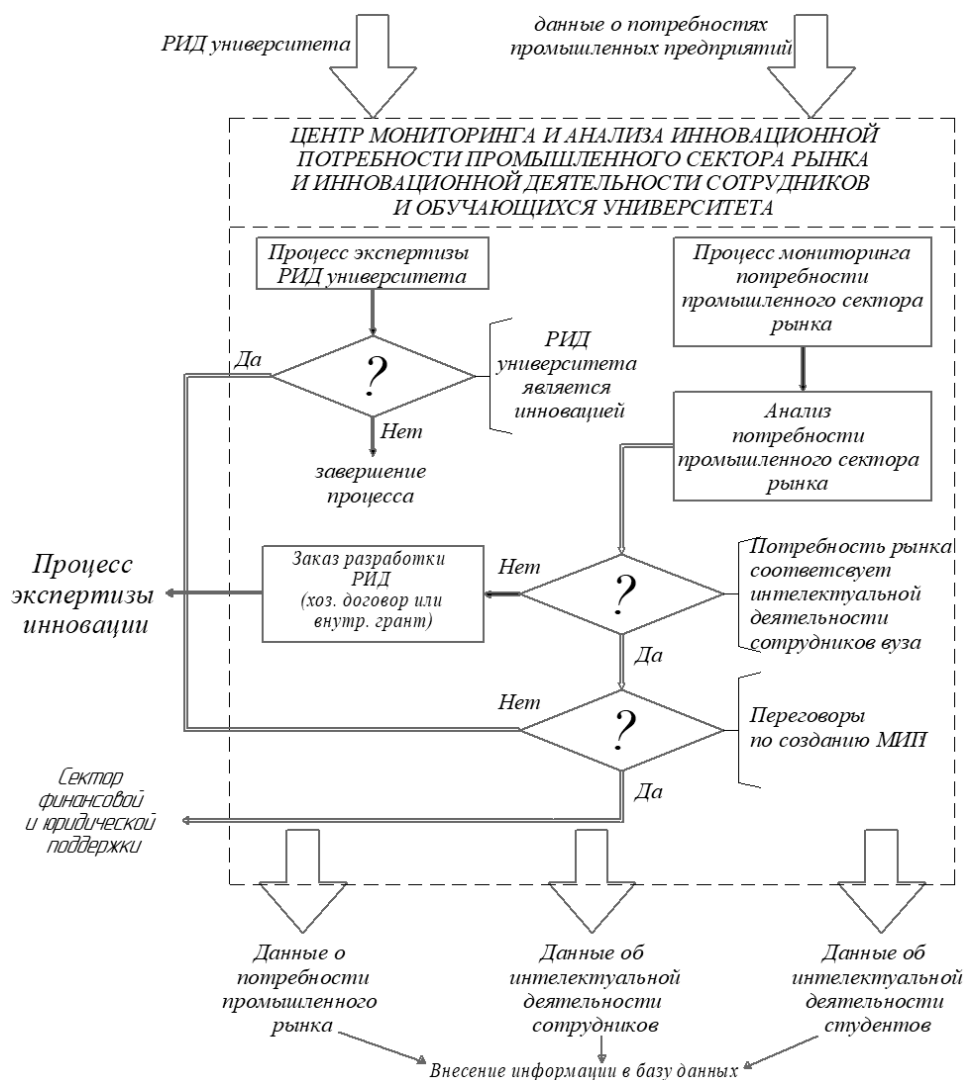


Рис. 2. Анализ инноваций

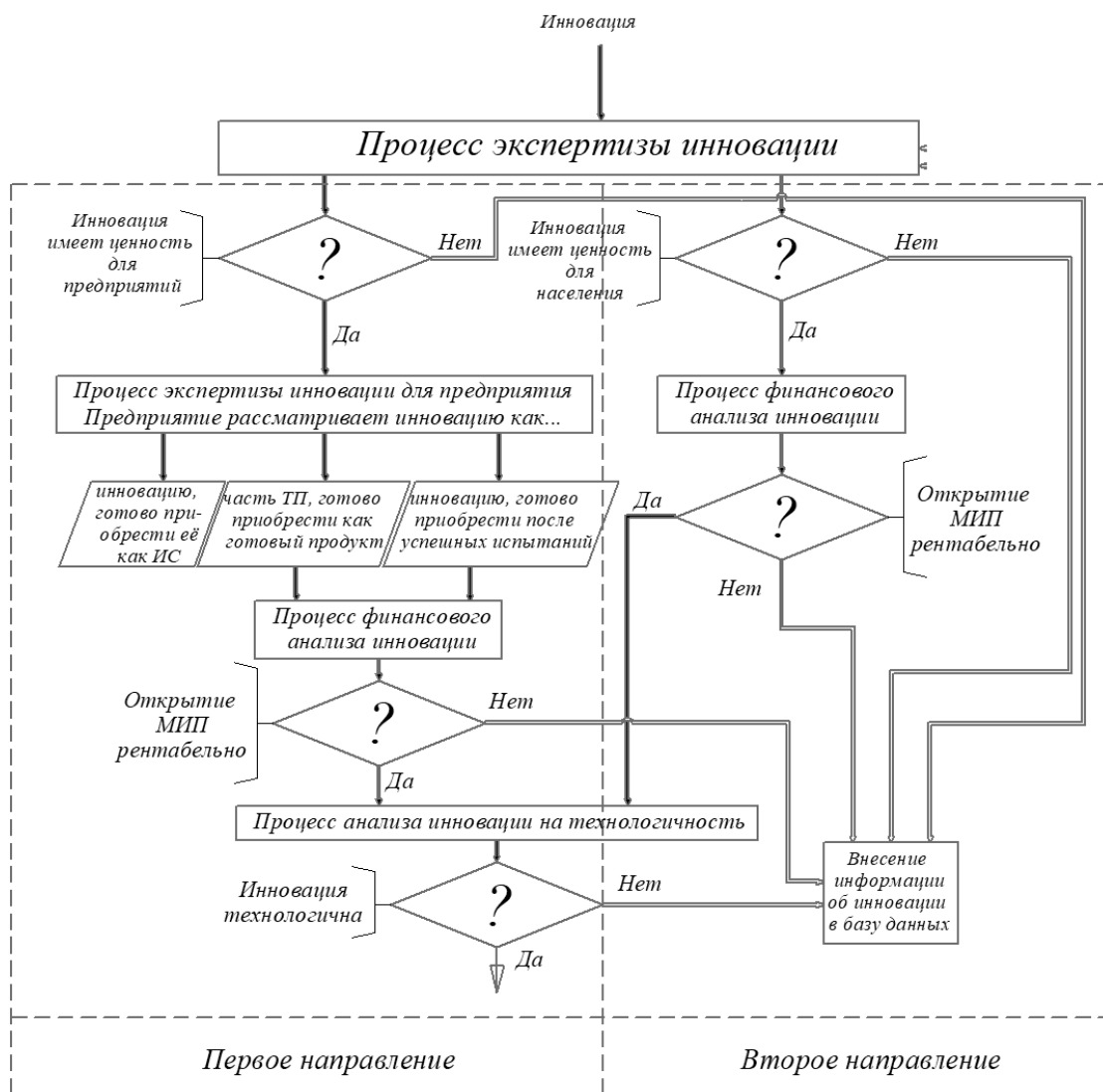


Рис. 3. Методика экспертизы инновации

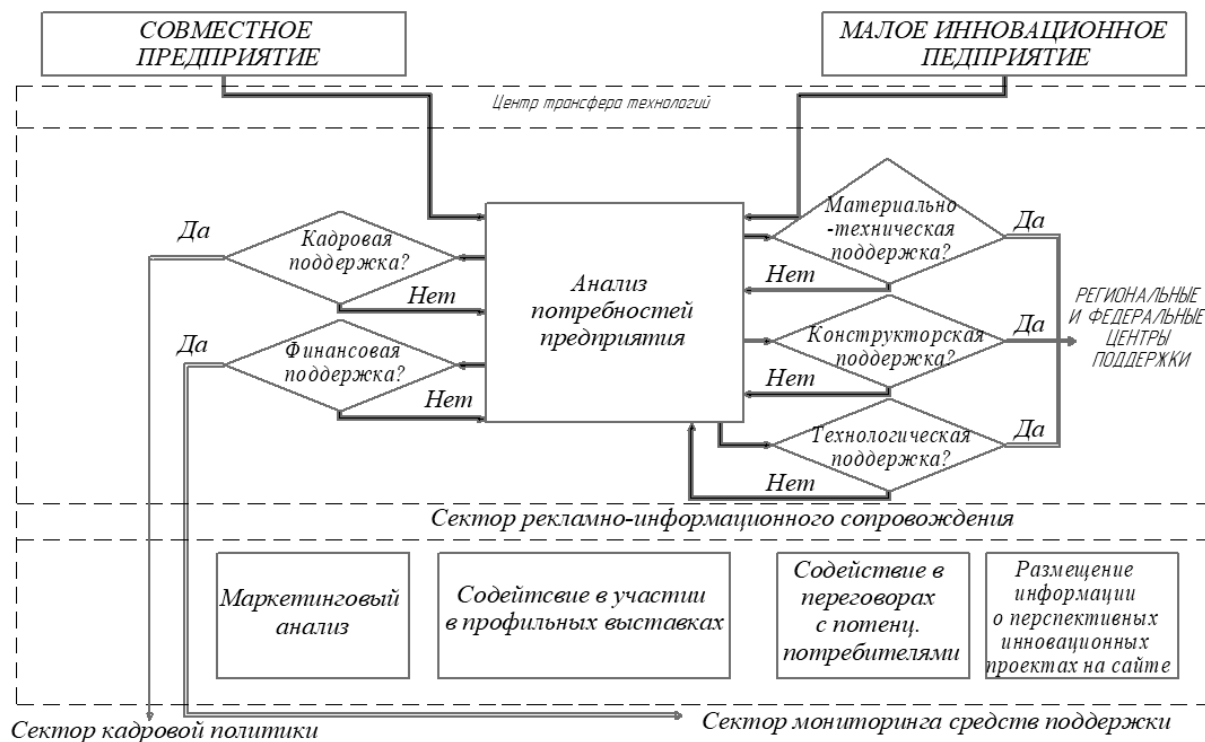


Рис. 4. Процесс работы центра сопровождения и поддержки

– центр трансфера технологий. В функции центра входят: оказание помощи в осуществлении процессов передачи технологий, создания связей между исследовательскими организациями и промышленностью; анализ потребностей и проблем созданных малых инновационных предприятий и содействие в их решении; пресечение недобросовестной конкуренции и «утечки» научно-технической информации. В центре отдельным подразделением будут созданы сектор рекламно-информационного сопровождения, осуществляющий рекламное сопровождение готового продукта малого инновационного предприятия и сектор мониторинга средств поддержки, осуществляющий поиск средств поддержки малых инновационных предприятий в лице венчурных фондов, бизнес-ангелов, грантов федерального и регионального уровней;

– сектор кадровой политики (HR-служба студентов). Задачей сектора является осуществление взаимодействия малых инновационных предприятий и кафедр с целью подбора персонала в работающие предприятия как на постоянной основе (трудовой договор), так и в рамках прохождения практик и выполнения курсовых проектов. В данном случае не рассматривается ППС вуза, потому что, как правило, преподаватели вуза не склонны менять преподавательскую и научную деятельность на производственную;

– сектор создания ИС. Сектор осуществляет регистрацию объектов интеллектуальной собственности в Федеральном институте промышленной собственности и получение охраняемых документов на университет. Функции данного сектора может осуществлять и осуществляет в настоящее время патентная группа университета. В данном случае наименование сектора характеризует его задачу получения охранных прав на объект интеллектуальной собственности, и по решению руководства вуза ему может быть присвоено другое наименование.

Созданный офис, помимо положительных эффектов, будет также иметь возникающий эффект синергии, возможность получения финансовой поддержки от институтов развития РФ и субсидий из федерального бюджета.

Реализация представленной концепции позволит увеличить:

- количество проектов, выполненных в рамках кооперации с малыми инновационными и совместными предприятиями;
- количество результатов интеллектуальной деятельности сотрудников университета, введенных в хозяйственный оборот малыми инновационными предприятиями;
- число малых инновационных предприятий при университете;
- долю регионального рынка инновационной продукции, приходящегося на малые инновационные предприятия, организованные на базе университета;
- количество сотрудников университета, работающих в малых инновационных предприятиях;
- количество выпускников университета, работающих в малых инновационных предприятиях.

Для региона реализация концепции позволит:

- обеспечить ускоренное развитие инновационного сектора экономики региона;
- стимулировать социально-экономическое развитие региона;
- увеличить число высокооплачиваемых рабочих мест;
- повысить эффективность системы подготовки кадров для потребностей экономики;
- создать спрос на специализированные материально-технические ресурсы и услуги;
- стимулировать развитие кооперации в области НИОКР и развитие механизмов коммерциализации технологий.

Осуществление эффективных инновационных проектов увеличивает поступающий в распоряжение общества внутренний валовой продукт (ВВП), который затем делится между участвующими в проекте субъектами (фирмами (акционерами и работниками), банками, бюджетами разных уровней и пр.). Поступлениями и затратами этих субъектов определяются различные виды эффективности инновационных проектов (ИП).

Рекомендуется оценивать следующие виды эффективности:

- эффективность проекта в целом;
- эффективность участия в проекте.

Эффективность проекта в целом оценивается с целью определения потенциальной привлекательности проекта для возможных участников и поисков источников финансирования. Она включает в себя:

- общественную (социально-экономическую) эффективность проекта;
- коммерческую эффективность проекта.

Показатели общественной эффективности учитывают социально-экономические последствия осуществления ИП для общества в целом, в том числе как непосредственные результаты и затраты проекта, так и «внешние»: затраты и результаты в смежных секторах экономики, экологические, социальные и иные внеэкономические эффекты. «Внешние» эффекты рекомендуется учитывать в количественной форме при наличии соответствующих нормативных и методических материалов. Если «внешние» эффекты не допускают количественного учета, следует провести качественную оценку их влияния.

Показатели коммерческой эффективности проекта учитывают финансовые последствия его осуществления для участника, реализующего ИП, в предположении, что он производит все необходимые для реализации проекта затраты и пользуется всеми его результатами.

Показатели эффективности проекта в целом характеризуют с экономической точки зрения технические, технологические и организационные проектные решения.

Эффективность участия в проекте определяется с целью проверки реализуемости ИП и заинтересованности в нем всех его участников.

Эффективность участия в проекте включает:

- эффективность участия предприятий в проекте (эффективность ИП для предприятий-участников);
- эффективность инвестирования в акции предприятия (эффективность для акционеров акционерных предприятий, финансирующих ИП);
- эффективность участия в проекте структур более высокого уровня по отношению к предприятиям – участникам ИП, в том числе:
 - региональную и народнохозяйственную эффективность – для отдельных регионов и народного хозяйства РФ;
 - отраслевую эффективность – для отдельных отраслей народного хозяйства, финансово-промышленных групп, объединений предприятий и холдинговых структур;
 - бюджетную эффективность ИП (эффективность участия государства в проекте с точки зрения расходов и доходов бюджетов всех уровней).

4. Экспертиза инновации

Перед проведением экспертизы инноваций проводится анализ представленных результатов интеллектуальной деятельности (далее – РИД), целью которого является ответ на вопрос: «Является ли РИД инновацией?». При отрицательном ответе последующая экспертиза не производится.

На первом этапе экспертизы определяется, является ли инновация ценной для общества либо она представляет ценность для хозяйствующих субъектов. Далее экспертиза проводится по двум направлениям (рис. 4). Первое направление основано на том, что инновация не представляет ценности для хозяйствующих субъектов, но является общественно значимой. Такой вариант возможен при отсутствии в регионе производственных предприятий, производящих аналоги инновации либо готовых приобрести данную инновацию. Второе – хозяйствующие субъекты готовы приобрести инновацию либо включить ее в существующие технологические процессы.

На первом направлении рассчитываются показатели эффективности инновации в целом. Цель этого этапа – агрегированная экономическая оценка проектных решений и создание не-

обходимых условий для поиска инвесторов. Для локальных проектов оценивается только их коммерческая эффективность и, если она оказывается приемлемой, рекомендуется непосредственно переходить к этапу оценки на технологичность. При недостаточной коммерческой эффективности ИП рекомендуется рассмотреть возможность применения различных форм его поддержки, которые позволили бы повысить коммерческую эффективность ИП до приемлемого уровня.

Второе направление экспертизы осуществляется после выработки схемы финансирования. На этом этапе уточняется состав участников и определяются финансовая реализуемость и эффективность участия в проекте каждого из них (региональная и отраслевая эффективность, эффективность участия в проекте отдельных предприятий и акционеров, бюджетная эффективность и пр.).

5. Коммерциализация инновации

После проведения экспертизы инноваций следует определиться, каким образом реализовать новинку на рынке. Кто является потребителем: производящие промышленные предприятия или эксплуатирующие организации, то есть кто будет получать прибыль при внедрении? Для этой цели необходим анализ рынка, контакты с заинтересованными организациями и/или организациями-потребителями. Далее последует внедрение путем продажи инновации. Если заинтересованные организации отсутствуют, но инновация имеет высокий потенциал коммерциализации среди населения, тогда следует создавать малое инновационное предприятие (МИП) при вузе, рассмотрев при этом и предложив организовать совместное предприятие (СП) с промышленными партнерами, что позволит получить средства государственной поддержки. ЦСП должен сопровождать инновацию не только до открытия МИП, но и в первые несколько лет после. Как правило, руководителями МИП становятся авторы разработок или их ученики, которые зачастую не имеют опыта управления коммерческим предприятием. В этой связи должна быть предоставлена помощь в бизнес-планировании, подборе кадров (куда могут быть вовлечены студенты по профильным направлениям подготовки), предоставлении материально-технической базы и производственных площадей, если вуз имеет возможность предоставить производственные площади. Особый акцент следует сделать на маркетинговой политике и контроле показателей развития МИП. Под контролем показателей следует понимать выполнение плана производства, сбыта, налаживание деловых контактов и в случае их невыполнения вузу следует вмешаться в дела МИП, вплоть до смены руководства (рис. 5).

Внедрение представленной концепции, на взгляд авторов, позволит не просто увеличить число малых инновационных предприятий, созданных при вузах, а сделать их коммерчески прибыльными. Главное, что позволит сделать настоящая концепция – это расширить коммерциализацию результатов интеллектуальной деятельности сотрудников вузов и контролировать показатели создания РИД по требованиям организаций реального сектора экономики.

6. Заключение

В результате проведенных исследований установлено:

1. Использование процессного подхода к формированию стратегии внедрения инноваций в высшем учебном заведении является наиболее актуальным.
2. Процесс коммерциализации инноваций необходимо осуществлять с учетом потребностей промышленных партнеров.
3. Оптимальным решением с точки зрения неизменения штатного расписания высшего учебного заведения в сторону увеличения является использование имеющихся ресурсов кадровых работников по предложенной методике.

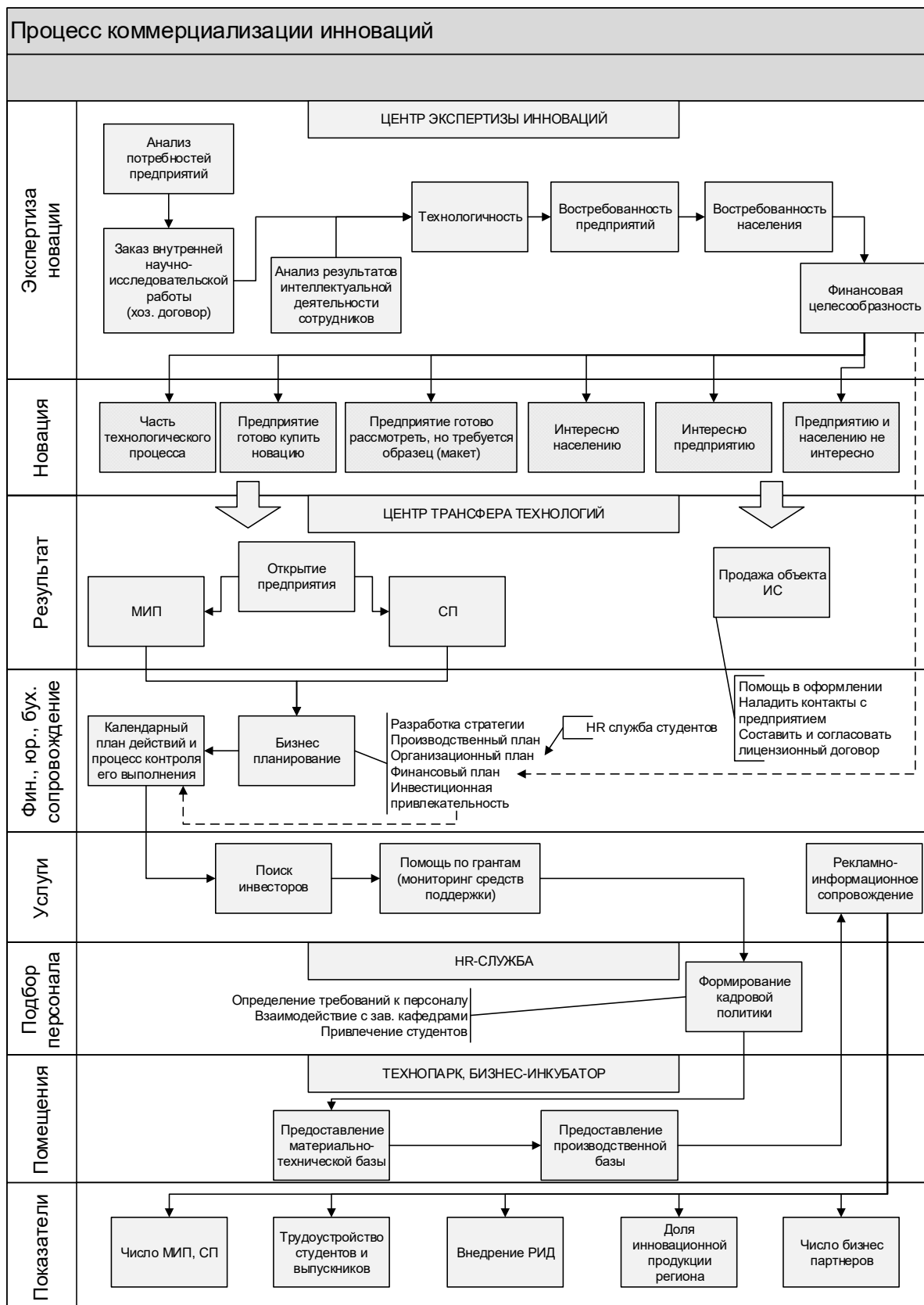


Рис. 5. Процесс коммерциализации инноваций

Литература

1. Указ Президента РФ от 7 мая 2018 г. № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года».
2. Бовкун А. С. Формирование подходов к повышению эффективности управления инновационной деятельностью вуза: диссертация ... кандидата экономических наук: 08.00.05 / Бовкун Александр Сергеевич; [Место защиты: Иркут. гос. техн. ун-т]. Иркутск, 2014. 143 с
3. Тимохина Е. В. Управление научно-исследовательской деятельностью и инновационным развитием университета: диссертация ... кандидата экономических наук: 08.00.05 / Тимохина Елена Витальевна; [Место защиты: Юго-Зап. гос. ун-т]. Курск, 2019. 196 с.
4. Латуха О. А., Пушкарёв Ю. В. Инновационная деятельность современного вуза: тенденции развития // Вестник НГПУ. 2012. № 4. С. 44–50.
5. Шулаков Н. А., Рупосов В. Л. Оценка инновационной составляющей деятельности МИП методом Гудвилла // Проблемы управления производственными и инновационными системами. Изд-во ИРНИТУ. 2016. С. 80–81.
6. Тукуреев В. И., Новгородова Т. А., Силкин М. И., Покусаева А. А. Отечественный и зарубежный опыт поддержки малых инновационных предприятий // Экономика и социум. 2019. № 1-1 (56). С. 948–952.

*Статья поступила в редакцию 13.07.2021;
переработанный вариант – 11.01.2022.*

Шалыгин Михаил Геннадьевич

д.т.н., доцент, заведующий кафедрой трубопроводных транспортных систем Брянского государственного технического университета (241035, Брянск, б-р 50 лет Октября, 7), тел. (4832) 588-212, e-mail: migshalygin@yandex.ru.

Макаров Григорий Николаевич

главный инженер проекта АО «ЭРИКССОН КОРПОРАЦИЯ АО» (241000, Брянск, ул. Дуки, 56), тел. (4832) 588-212, e-mail: makarov_g.n.89@mail.ru.

The concept of creating a medium to promote innovative developments created in higher educational institutions

Mikhail G. Shalygin

Doctor of technical sciences, Associate professor, Bryansk State Technical University (BSTU, Bryansk, Russia), migshalygin@yandex.ru.

Grigory N. Makarov

Chief Project Engineer, JSC "ERICSSON CORPORATION JSC" (Bryansk, Russia), makarov_g.n.89@mail.ru.

Based on the trends in the development of Russian higher education and the innovative development of the Russian Federation the concept of assessing the innovative potential of the faculty and scientific staff of higher educational institutions developments is proposed. The functions and divisions of the innovation creation and support office are described as well as the scheme of interaction of the office with the centers of regional support for small businesses and acceleration programs of federate entities. The article describes in detail the actions of the information - analytical center for the process of innovations examination created in

higher educational institution in the course of intellectual or contractual activities and the center for supporting innovations in the process of intellectual activity results commercialization through the creation of small innovative enterprises, joint ventures or the sale of intellectual activity object. A detailed description of the two directions of development in the examination of innovation including the financial analysis of innovation, the analysis of manufacturability and commercializability is given. Recommendations on the organization of the processes of expertise and commercialization of innovations are given.

Keywords: innovation, result of intellectual activity, small innovative enterprise, commercialization, management.

References

1. Decree of the President of the Russian Federation no. 204 dated 2018 May 7 "On National goals and strategic objectives of the development of the Russian Federation for the period up to 2024".
2. Bovkun A.S. Formirovanie podhodov k povysheniyu effektivnosti upravleniya innovacionnoj deyatel'nost'yu vuza [Formation of approaches to improving the efficiency of management of innovative activities of the university]. Candidate of Economic Sciences degree dissertation. Irkutsk. 2014. 143p.
3. Timokhina E.V. Upravlenie nauchno-issledovatel'skoj deyatel'nost'yu i innovacionnym razvitiem universiteta [Management of research activities and innovative development of the university]. Candidate of Economic Sciences degree dissertation. Kursk. 2019. 196 p.
4. Latukha O.A., Pushkarev Yu.V. Innovacionnaya deyatel'nost' sovremennogo vuza: tendencii razvitiya [Innovative activity of a modern university: development trends]. Bulletin of the NGPU, 2012, no 4, pp. 44-50.
5. Shulakov N.A., Ruposov V.L. Ocenka innovacionnoj sostavlyayushchej deyatel'nosti MIP metodom Gudvilla [Assessment of the innovative component of MIP activity by the Goodwill method]. Problems of management of production and innovation systems. INRTU Publishing House, 2016, pp. 80-81.
6. Tukureev V.I., Novgorodova T.A., Silkin M.I., Pokusaeva A.A. Otechestvennyj i zarubezhnyj opyt podderzhki malyh innovacionnyh predpriyatij [Domestic and foreign experience in supporting small innovative enterprises]. Economy and society, 2019, no. 1-1 (56), pp. 948-952.

К вопросу о подготовке данных при разработке модели нейронной сети

С. Б. Жанаева

Одной из особенностей работы операторов мобильной сети передачи данных является необходимость в постоянном мониторинге и обслуживании оборудования и каналов связи. Происходящие сбои в работе оборудования увеличивают стоимость эксплуатации и уменьшают лояльность клиентов. Возможность заблаговременного предсказания сбоев в работе сети послужило бы отличным решением для мобильных операторов. В текущей статье рассматривается вопрос предварительной подготовки собранных данных о работе мобильной сети оператора связи 4G+ для дальнейшего использования при разработке нейронной модели для предсказания сбоев. Приведены результаты проведенного анализа собранных данных, показаны характеристики, состав и структура данных, особенности которых в дальнейшем могут повлиять на обучение нейронной модели.

Ключевые слова: подготовка данных для нейронной модели, статистический анализ данных, мобильные сети, сбои в работе оборудования.

1. Введение

Подготовка данных для обучения модели нейронной сети является важным этапом разработки и создания модели. От качества подготовленных данных зачастую зависит производительность, точность и эффективность разработанной модели нейронной сети [1]. Для подготовки больших объемов данных как нельзя лучше подходят различные статистические методы, они важны при подготовке как обучающих, так и тестовых наборов данных, например, сюда входят следующие техники [2]:

- обнаружение выбросов;
- обработка пропущенного значения;
- выборка данных;
- масштабирование, нормализация данных;
- переменное кодирование;
- проверка корреляции переменных.

Предварительное понимание состава и распределения данных, анализ с помощью описательной статистики и визуализации необходимы для того, чтобы в дальнейшем определить наиболее подходящие методы и алгоритмы, которые следует выбрать при работе с данными [3].

В текущей статье описывается подготовка данных для создания модели нейронной сети, прогнозирующей возникновение сбоев в работе оператора мобильных данных. Сбор данных выполнялся в течение десяти месяцев в телекоммуникационной сети мобильного оператора 4G+. Таким образом, были собраны два типа данных: о состоянии базовых станций и об аварийных ситуациях на станциях.

При подготовке собранных данных было использовано несколько видов статистического анализа, и в результате были выявлены некоторые интересные ключевые моменты и критические проблемы.

2. Обзор литературы

При обучении нейронной сети подготовка данных играет большую, порой решающую, роль. От качества выполненной подготовки данных зависит точность и полнота предсказаний нейронной модели. Поэтому вопросу подготовки данных исследователи уделяют повышенное внимание.

Например, В. Schmidt и L. Wang [4] полагают, что одна из основных проблем при подготовке данных для прогнозирования сбоев заключается в том, что анализируются данные только из одного типа источников. Поэтому они использовали данные, полученные из различных функциональных департаментов компании, таких как служба эксплуатации, планирование, служба контроля качества и других. Исследователи в [5] также для получения наиболее полного объема информации о происходящих сбоях в работе оборудования выполняли сбор, подготовку и анализ данных, получаемых из различных источников. Собранные данные авторы [4–8] анализировали с помощью методов статистического анализа, проверяли состав и структуру данных.

Большинство исследователей [4–7] считают, что извлечение признаков — важный этап предварительной обработки, на котором необработанные данные, собранные из различных сигнальных каналов, преобразуются в набор статистических признаков в формате, поддерживаемом алгоритмами машинного обучения. Так, разработчики нейронной модели [4–7] определили статистические характеристики, которые затем передали в качестве входных данных для алгоритма машинного обучения. Набор статистических характеристик, извлеченных из сигнальных каналов, включал максимум, медиану, среднее значение и стандартное отклонение.

Исследователи [7, 8] выполнили подготовку материалов в несколько шагов: разделили и использовали базу данных (БД) об авариях в качестве маркированных данных; нормализовали и масштабировали данные, приведя их к единой размерности; разделили БД на обучающую, проверочную и тестовую. Во время предварительной обработки информации извлекли значения признаков корреляции временных рядов и в дальнейшем использовали их как входную информацию для глубоких нейронных сетей.

3. Подготовка данных о функциональном состоянии базовых станций

Во время сбора данных при наблюдении и анализе работы базовых станций (БС) было замечено, что только на 30–35 % станций были зафиксированы аварийные сообщения. Большинство БС во время наблюдения работали без нареканий, чего и следовало ожидать. Таким образом, база данных, содержащая информацию о функциональном состоянии оборудования, содержит информацию как о станциях, на которых не возникало аварий, так и информацию по станциям с авариями.

Для обучения нейронной модели прогнозированию аварий и причин аварий понадобятся данные со станций, на которых были зафиксированы аварии и на которых аварии не появлялись. Поэтому была выполнена выборка данных и сформированы две отдельные базы данных о функциональном состоянии базовых станций с авариями и без них.

В качестве одного из этапов подготовки данных была выполнена проверка собранных данных. По результатам проверки выяснилось, что некоторые строки (около 1.7 %) содержали пустые значения, кроме того, в некоторых ячейках (около 3.8 %) стояли не числовые значения,

а буквенные. Буквенные значения содержали аббревиатуру INF (Information Not Found), что означает потерю и пропуск собранных данных.

На следующем этапе была выполнена очистка данных: строки с пропущенными значениями были удалены; поля, заполненные буквенными значениями, были заменены на среднее арифметическое от соседних значений в столбце.

В каждой из собранных баз данных о функциональном состоянии базовых станций Average KPI и Channel KPI содержится информация о 2700 базовых станциях по 42 показателям. С помощью библиотек Python Numpy и Pandas [9] были определены количество собранных данных, размерность. После очистки баз данных и удаления отсутствующих значений базы данных приобрели следующую размерность:

- база данных Average KPI содержит 878793 строки записей по 42 показателям, из них 347556 строк содержат информацию по базовым станциям с авариями и 531237 строк содержат информацию по базовым станциям без аварий;
- база данных Channel KPI содержит 878629 строк записей по 42 показателям, из них 347556 строк содержат информацию по базовым станциям с авариями и 531073 строки содержат информацию по базовым станциям без аварий.

После выборки, проверки и очистки данных были заданы переменные: столбцам с 42 показателями были последовательно присвоены имена переменных от D1 до D42.

Для лучшего понимания состава и структуры собранных данных использовались методы описательной статистики, эти методы могут дать хорошее представление о свойствах каждого атрибута данных [2, 10, 11]. Так, с помощью функции `description()` библиотеки Pandas [9] определили 8 основных статистических свойств каждого атрибута: количество, математическое ожидание, среднееквадратичное отклонение, минимальное значение, 25-, 50-, 75-процентные значения, максимальное значение. Ниже в табл. 1 показаны статистические характеристики атрибутов собранных данных о состоянии БС по выборочным показателям D4–D9.

Таблица 1. Статистические характеристики атрибутов D4–D9

Параметр	D4	D5	D6	D7	D8	D9
<i>count</i>	878593	878217	877929	878684	878744	878649
<i>mean</i>	0.972533	0.873245	0.928842	0.942802	0.03580	0.02416
<i>std</i>	0.166	0.01347	0.0107	0.0108	0.01824	0.01559
<i>min</i>	0.0000	0.0000	0.25103	0.00043	0.0049	0.0049
25 %	1.0000	0.0000	0.92847	0.94143	0.0154	0.0081
50 %	1.0000	0.47453	0.93131	0.94346	0.0194	0.0186
75 %	1.0000	0.73461	0.93245	0.94542	0.0227	0.0592
<i>max</i>	1.0000	1.0000	0.99753	0.94551	0.09451	0.0956

Проверка и анализ базы данных о состоянии базовых станций показали, что некоторые атрибуты этой базы данных обладают большой разрежённостью, содержат большое количество нулей в значениях. Например, атрибут D9 (DROP_RATE_LTE), который отображает процент соединений LTE, завершившихся обрывом, содержит около 94 % нулевых значений. Следовательно, во время наблюдения на 94 % базовых станций обрывы соединений LTE не были зафиксированы. Как известно, большая разрежённость базы данных приносит проблемы при разработке нейронной модели, так как увеличивает требуемое время для обучения модели.

При обучении нейронной сети одним из приемов, которые ускоряют обучение модели, является нормализация входных данных [1, 11]. Нормализация данных позволяет масштабировать числовые значения в указанном диапазоне. Нормализация данных была выполнена методом масштабирования данных на основе математического ожидания и среднееквадратичного отклонения: деление разницы между данными и математическим ожиданием на величину среднееквадратичного отклонения [1, 11, 12] по следующим формулам:

$$\mu = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_i,$$

$$\sigma^2 = \mu [x - \mu(x)]^2, \quad (1)$$

$$x_{in} = \frac{x_i - \mu(x_i)}{\sigma},$$

где μ – математическое ожидание, σ – среднеквадратичное отклонение, x_i – i -ое значение показателя x , x_{in} – новое нормализованное значение показателя x . Нормализация была выполнена для всех показателей по столбцам, кроме, столбцов времени, даты и уникального идентификатора соты. Всего нормализация данных была выполнена по 39 показателям.

4. Подготовка данных об авариях на базовых станциях

С помощью библиотек Python Numpy и Pandas [9] были определены количество собранных данных по авариям и размерность. Так, база данных по аварийным ситуациям содержит 3847653 строки записей и 5 столбцов. Каждая строка отображает сообщение об аварийном состоянии оборудования мобильной сети. Столбцы содержат следующие данные: уровень критичности аварии, наименование и ID базовой станции, время фиксирования аварии, предположительная причина аварии, наименование трансмиссии. При подготовке базы данных по авариям часть строк записей были удалены, ниже перечислены причины.

1. Удаление дублирующих сообщений. При мониторинге работы базовых станций и сборе данных было отмечено, что в зависимости от типа аварии на станции сообщения об одной и той же проблеме могут появляться в системе мониторинга несколько раз. Дублирующие сообщения могут отображаться в системе мониторинга с разницей в несколько секунд или минут, создавая избыточность в базе данных. При выполнении проверки собранных данных подобные дублирующие сообщения были удалены.

2. Удаление пропущенных значений. При выполнении проверки собранных данных оказалось, что часть полей (около 1.2 %) содержали пустые значения, некоторые поля (ок. 2.6 %) были заполнены буквенной аббревиатурой INF (Information Not Found), т.е. часть данных была потеряна. Данные были очищены от пропущенных значений следующим образом: так как пустых и буквенных значений было немного, а общего количества данных по авариям было достаточно, то строки с пустыми полями были удалены.

3. Удаление форс-мажорных аварийных ситуаций. При создании модели нейронной сети, прогнозирующей возникновение сбоев и аварийных ситуаций в работе оборудования, необходимо учесть тот факт, что, несмотря на все вычислительные способности разрабатываемой модели, некоторые форс-мажорные аварийные ситуации предсказать невозможно, так как причины их возникновения не зависят от состояния оборудования или показателей характеристик радиоканалов. Например, к таким аварийным ситуациям относятся сбои с внешней причиной возникновения, такие как отключение электропитания на подстанции или срабатывание датчика открытия дверей при посещении места установки базовой станции персоналом. Чтобы не обучить разрабатываемую модель выводу ложных случайных зависимостей, была проведена выборка данных, и данные об авариях отключения питания, открывания дверей, срабатывания датчиков движения были удалены.

После очистки баз данных, выполнения выборки, удаления отсутствующих полей, избыточности дублирующих сообщений база данных по авариям приобрела следующую размерность: 347556 строк записей и 5 столбцов.

Показатели базы данных по авариям носят категориальный характер, например, это уровни критичности, наименования аварий и трансмиссия.

Для дальнейшей работы с базой данных необходимо было выполнить кодирование переменных, поэтому показателям в заголовках столбцов в базе данных по авариям были присвоены переменные от BDA1 до BDA5 по порядку следования. В табл. 2 показана выборка из базы данных по авариям с присвоенными переменными.

Таблица 2. Выборка из базы данных по аварийным ситуациям в сети

Уровень	Наименование	Время	Предполагаемая причина	Трансмиссия
BDA1	BDA2	BDA3	BDA4	BDA5
Minor	37323_AKT-Beyneu	2021-02-15 11:32:28	Abis control link broken	Aktau-BSC-2
Minor	51247_KZL-Merke	2021-02-15 11:32:28	Abis control link broken	Kzl-BSC-1
Major	71422_ALM-Issyk	2021-02-15 11:32:28	Rectifier failure	Alm-BSC-2
Critical	37375_AKT-Karasu	2021-02-15 11:32:29	POWER OFF	Aktau-BSC-2
Minor	71458_ALM-Issyk	2021-02-15 11:32:29	Abis control link broken	Alm-BSC-1

Атрибутам наименований аварий (Abis control link broken, Rectifier failure, SCTP association is broken и т.д.) показателя BDA4 были присвоены переменные от A1 до A12 в зависимости от типа аварийного сообщения. Атрибутам уровней критичности присвоены переменные от AL1 до AL4 (Critical, Major, Minor, Warning) соответственно. Атрибуты показателей времени, даты аварии и уникального идентификатора соты не изменялись.

Так как показатели данных по авариям категориальные, то методы описательной статистики, рассчитывающие математическое ожидание, среднее квадратичное отклонение и т.д., предназначенные для числовых значений, в данном случае не применимы. Поэтому для анализа данных воспользовались методами распределительной статистики с целью проверки, каких значений больше, как они распределены по общему объему данных [2, 12]. Для того чтобы проанализировать распределение атрибутов классов, воспользовались инструментами библиотеки Pandas. Некоторые результаты анализа данных приведены в табл. 3.

Таблица 3. Количество сообщений по уровням аварийных ситуаций

№ п.п.	Заданные переменные	Уровень критичности	Количество аварийных сообщений
1	AL4	Warning	97868
2	AL3	Minor	99866
3	AL2	Major	86889
4	AL1	Critical	62933

При решении категориальных задач нужно представлять, насколько сбалансированы значения классов. Если значения классов довольно сильно несбалансированы (т.е. присутствует намного больше наблюдений для одного класса, чем для другого), то это приведет к дополнительным сложностям при обучении модели и может потребоваться специальная обработка на этапе подготовки данных [2, 12]. Так как в текущем исследовании именно предполагаемый тип аварийной ситуации планируется использовать в качестве ответа, выдаваемого нейронной моделью, то важно было определить, как количественно распределены сообщения о

различных типах аварий на станциях. Это было выполнено с помощью инструментов библиотеки Pandas. Ниже в табл. 4 приведены результаты.

Таблица 4. Количество аварийных сообщений по видам аварии

№ п.п	Вид аварийного сообщения	Количество сообщений
1	A1	24 329
2	A2	17 378
3	A3	35 104
4	A4	28 085
5	A5	41 707
6	A6	34 408
7	A7	10 427
8	A8	24 610
9	A9	17 659
10	A10	52 133
11	A11	27 804
12	A12	33 913

Как видно из результатов анализа данных, наименьшее количество сообщений приходится на аварийные ситуации вида А7. Количественное распределение сообщений по остальным видам аварийных ситуаций А1–А6, А8–А12 относительно равномерно. Следовательно, необходимо определить, достаточно ли будет собранных данных – 10427 записей – для прогнозирования возникновения аварийной ситуации вида А7. Сделать это необходимо эмпирическим путем, проверив на тестовых данных, с какой точностью нейронная модель сможет спрогнозировать аварии вида А7.

5. Подготовка данных по первопричинам аварий

Несмотря на то, что система мониторинга работы базовых станций при обнаружении сбоев в работе оборудования выдает сигнал аварии и причину возникновения аварийной ситуации, в ряде случаев бывает так, что выданная системой мониторинга причина не в полной мере соответствует действительности. Выехавшая на место инженерная бригада обнаруживает другую причину сбоев или совокупность причин. При наблюдении за системой мониторинга и сбоями в сети было замечено, что около 7.4 % причин аварий, выданных системой мониторинга, отличается от выявленных и подтвержденных причин, определенных на месте установки оборудования.

Поэтому для повышения точности прогнозирования было принято решение учитывать скорректированные инженерами первопричины аварийных ситуаций. Скорректированные данные по первопричинам аварий сохранялись в *xls*-файле, затем при загрузке в Python они были преобразованы в формат *csv*-файла. С помощью библиотек Python Numpy и Pandas были определены количество собранных данных и размерность. База данных по первопричинам аварий имела 68596 строк и 4 столбца записей.

Как видно из результатов вычислений, информации по первопричинам аварий, которую удалось собрать вручную, оказалось намного меньше количества данных, собранных с помощью автоматической системы мониторинга. Но, несмотря на малый объем, собранные вручную данные репрезентативны. Информация в этой базе данных была получена путем визита на место установки оборудования и проверена инженерной бригадой.

С целью дальнейшего обучения нейронной модели база данных по первопричинам аварий была объединена с базой данных по авариям, зафиксированным с помощью системы

мониторинга. При объединении баз данных причины аварий, соответствующие по времени, месту и дате, были заменены первопричинами аварий, выявленных инженерами.

6. Корреляция между показателями

Перед началом обучения нейронной сети были проверены и определены показатели, наиболее коррелирующие с возникновением сбоев на станциях. В качестве предварительной оценки корреляции изменений 39 показателей при возникновении или отсутствии аварий было выполнено сравнение статистических характеристик показателей в случае отсутствия аварийных ситуаций и в случае наличия сбоев на станции. Для этого воспользовались базами данных о состоянии базовых станций, описанными в разделе 3, разделенными на базы данных без аварий и с авариями.

Были вычислены математические ожидания и стандартные отклонения [1, 2] по 39 показателям состояния базовых станций для аварийных ситуаций и для случаев, когда аварии на станциях не были зафиксированы. Вычисленные значения были нормализованы. Показатели были разбиты на группы по 10 показателей, и проверка выполнялась поочередно. На рис. 1 показаны значения нормализованного математического ожидания показателей состояния базовых станций для выборочных атрибутов D4–D9, вычисленных для трех различных случаев.

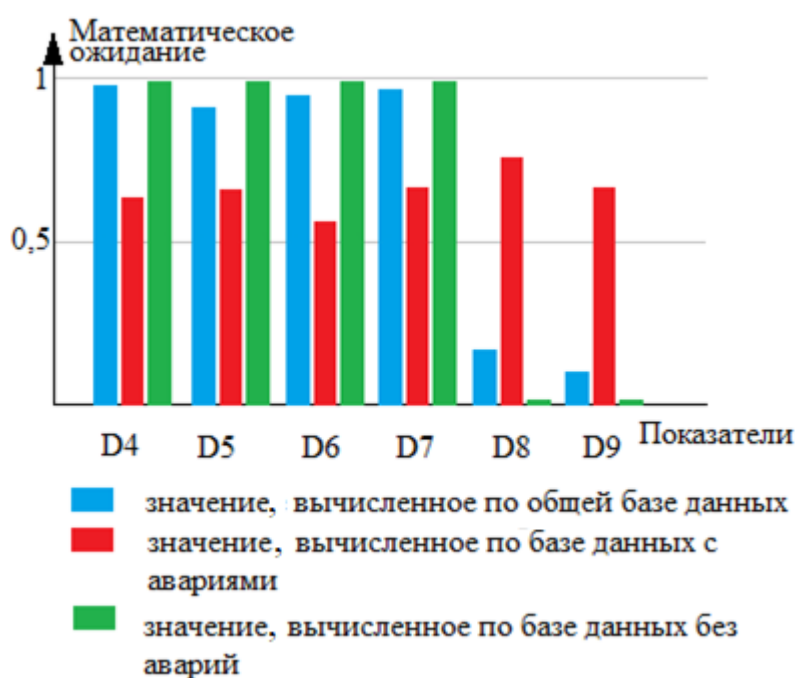


Рис. 1. Значения математического ожидания показателей D4–D9.

Как видно из рис. 1, значения атрибутов D4–D9 коррелируют с появлением аварийных ситуаций, причем они имеют как положительную, так и отрицательную корреляцию.

Для количественной оценки взаимосвязи между различными атрибутами и сообщениями об аварийных ситуациях воспользовались вычислением коэффициента корреляции Пирсона с помощью функции `pearsonr()` библиотеки NumPy [9, 12]. В табл. 5 приведены результаты вычисления коэффициента корреляции Пирсона для 39 атрибутов D4–D42. Атрибуты D1, D2, D3 содержат значения даты, времени возникновения аварии и уникальный идентификатор соты. По атрибутам D1–D3 вычисление коэффициента корреляции Пирсона не проводилось.

Таблица 5. Коэффициент корреляции Пирсона
между значениями атрибутов базы данных и сообщениями об авариях

№ п.п.	Атрибуты	Значения коэффициента корреляции Пирсона
1	D4	- 0.58
2	D5	- 0.62
3	D6	- 0.69
4	D7	- 0.73
5	D8	0.71
6	D9	0.88
7	D10	0.23
8	D11	0.12
9	D12	0.34
10	D13	0.28
11	D14	- 0.63
12	D15	- 0.77
13	D16	- 0.81
14	D17	- 0.76
15	D18	0.71
16	D19	0.86
17	D20	0.74
18	D21	0.82
19	D22	-0.37
20	D23	-0.32
21	D24	-0.28
22	D25	-0.23
23	D26	-0.27
24	D27	-0.25
25	D28	0.87
26	D29	0.84
27	D30	- 0.75
28	D31	- 0.82
29	D32	- 0.86
30	D33	- 0.83
31	D34	0.08
32	D35	0.21
33	D36	0.23
34	D37	0.15
35	D38	0.17
36	D39	- 0.86
37	D40	- 0.87
38	D41	- 0.73
39	D42	- 0.77

По значениям коэффициентов корреляции Пирсона из табл. 5 видно, что часть показателей состояния базовых станций показывают высокую степень изменчивости в случаях аварий на станциях. Например, атрибуты показателей D8, D9, D19, D20, D21 имеют высокую степень положительной корреляции с возникновением аварий. Показатели D7, D15, D16, D17, D30, D31, D32, D33, напротив, имеют отрицательную корреляцию.

Положительная корреляция с аварийными ситуациями наблюдалась у показателей функционального состояния БС, отображающих наличие каких-либо проблем при выполнении голосового соединения или передачи данных. Например, при увеличении количества аварийных ситуаций на станциях, увеличивалось и количество заблокированных соединений и соединений, завершившихся обрывом. Соответственно, отрицательная корреляция наблюдалась у показателей, характеризующих успешно установленные и завершённые голосовые соединения, пакетные передачи, объем переданного трафика и т.д.

7. Заключение

Качественно выполненная работа по подготовке данных является залогом высокой точности прогнозирования разрабатываемой нейронной модели. Поэтому на данном этапе исследовательской работы по прогнозированию сбоев в сети мобильного оператора были выполнены анализ и подготовка данных, которые включали в себя проверку и выборку данных, удаление и замену пропущенных значений, нахождение статистических характеристик, определение взаимозависимости атрибутов данных, нахождение коэффициентов корреляции. Проведенный анализ и подготовка собранных данных о функциональном состоянии и аварийных ситуациях на базовых станциях помогли определить основные характеристики данных, их состав, структуру, выявили закономерности в поведении данных, кроме того, были обнаружены некоторые проблемные моменты. Результаты проведенного анализа данных могут послужить хорошей отправной точкой в дальнейшем при обучении нейронной сети.

Литература

1. *Brink H., Richards J. W., Fetherolf M.* Real world Machine Learning. US: Manning Publications Co., 2017. 266 p.
2. *Hastie T., Tibshirani R., Friedman J.* The Elements of Statistical Learning Data Mining, Inference, and Prediction. Springer Series in Statistics / 2nd Edition. NY: Springer, 2017. 764 p.
3. *Грас Д.* Data science. Наука о данных с нуля: пер. с англ. СПб: БХВ-Петербург, 2017. 336 с.
4. *Schmidt B., Wang L.* Cloud-enhanced predictive maintenance // *Int J Adv Manuf Technol.* 2018. № 99. P. 5–13. DOI 10.1007/s00170-016-8983-8.
5. *Hu C., Youn B. D., Kim T.* Semi-supervised learning with co-training for data-driven prognostics // *Proc. IEEE Int. Conf. on Prognostics and Health Management: Enhancing Safety, Efficiency, Availability, and Effectiveness of Systems Through PHM Technology and Application.* Denver, CO, USA. 18–21 June, 2012. P. 1297–1306. DOI: 10.1109/ICPHM.2012.6299526.
6. *Wu D., Jennings C., Terpenney J., Kumara S.* Cloud-Based Machine Learning for Predictive Analytics: Tool Wear Prediction in Milling // *Proc. IEEE International Conference on Big Data (Big Data),* Washington, DC, USA, 5–8 December, 2016. P. 2062–2069.
7. *Yin-Hsin Liu, Yao-Chung Tu, Chang-Yu Hsu, Hsin-Chieh Chao.* Predicting malfunction of mobile network base station using machine learning approach // *Proc. 20th Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium (APNOMS),* Matsue, Japan, 18–20 September, 2019. P. 1–4. DOI: 10.23919/APNOMS.2019.8892894.
8. *Xu M., Baraldi P., Al-Dahidi S., Zio E.* Fault prognostics by an ensemble of Echo State Networks in presence of event based measurements // *Engineering Applications of Artificial Intelligence.* V. 87. 2020. P. e103346. DOI: 10.1016/j.engappai.2019.103346.
9. *McKinney W.* Python for Data Analysis: Data Wrangling with pandas, NumPy, and Jupyter. Boston: O'Reilly Media, 2022. 579 p.
10. *Hoaglin D. C., Mosteller F., Tukey J. W.* Understanding Robust and Exploratory Data Analysis. NY: Wiley-Interscience, 2000. 447 p.

11. Флах П. Машинное обучение. Наука и искусство построения алгоритмов, которые извлекают знания из данных / пер. с англ. А. А. Слинкина. М.: ДМК Пресс, 2015. 400 с.
12. Шолле Ф. Глубокое обучение на Python. Серия «Библиотека программиста». СПб.: Питер, 2018. 400 с.

*Статья поступила в редакцию 15.06.2022;
переработанный вариант – 01.10.2022.*

Жанаева Сауле Бактыкереевна

аспирант специальности 09.06.01, кафедра прикладной математики и кибернетики
СибГУТИ (630102, Новосибирск, ул. Кирова, 86), e-mail: szhanayeva@gmail.com.

Data preparation for a neural network model

Saule B. Zhanayeva

Postgraduate student, Siberian State University of Telecommunications and Information Science (SibSUTIS, Novosibirsk, Russia), szhanayeva@gmail.com.

One of the features of the mobile data network operators is the need for continuous monitoring and maintenance of equipment and communication channels. The equipment failures that sometimes occur increase the cost of operation and reduce customer loyalty. The ability to predict network malfunctions in advance would be a great solution for mobile operators. The paper discusses the issue of preliminary data preparation of 4G+ mobile network for further use in the development of a neural network model for predicting malfunctions. The results of the analysis of the collected data are presented, the characteristics, composition and data structure that may affect the training of the neural network model later are shown.

Keywords: data preparation for neural network, statistical data analytics, mobile networks, equipment malfunctions.

References

1. Brink H., Richards J. W., Fetherolf M. *Real world Machine Learning*. US, Manning Publications Co., 2017. 266 p.
2. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. *The Elements of Statistical Learning Data Mining, Inference, and Prediction*. Springer Series in Statistics. 2nd Edition. NY, Springer, 2017. 764 p.
3. Grus J. Data science. *Nauka o dannyh s nulya* [Data Science from Scratch]. Transl. from Eng. SPb, BHV-Peterburg, 2017. 336 p.
4. Schmidt B., Wang L. Cloud-enhanced predictive maintenance. *Int J Adv Manuf Technol.*, 2018, no 99, pp. 5–13. DOI 10.1007/s00170-016-8983-8
5. Hu, C., Youn, B. D., Kim, T. Semi-supervised learning with co-training for data-driven prognostics. *Proceedings of IEEE Int. Conf. on Prognostics and Health Management: Enhancing Safety, Efficiency, Availability, and Effectiveness of Systems Through PHM Technology and Application*. Denver, CO, USA. 18–21 June, 2012, pp. 1297-1306. DOI: 10.1109/ICPHM.2012.6299526
6. Wu D., Jennings C., Terpenney J., Kumara S. Cloud-Based Machine Learning for Predictive Analytics: Tool Wear Prediction in Milling. *IEEE International Conference on Big Data (Big Data)*. Washington, DC, USA, 5-8 December, 2016, pp. 2062-2069.
7. Yin-Hsin Liu, Yao-Chung Tu, Chang-Yu Hsu, Hsin-Chieh Chao. Predicting malfunction of mobile network base station using machine learning approach. *Proceedings of the 20th Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium (APNOMS)*. Matsue, Japan, 18-20 September, 2019, pp. 1-4. DOI: 10.23919/APNOMS.2019.8892894

8. Xu M., Baraldi P., Al-Dahidi S., Zio E. Fault prognostics by an ensemble of Echo State Networks in presence of event based measurements. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 87, 2020, pp. e103346. DOI: 10.1016/j.engappai.2019.103346
9. McKinney W. *Python for Data Analysis: Data Wrangling with pandas, NumPy, and Jupyter*. 3^d Ed. Boston, O'Reilly Media, 2022. 579 p.
10. Hoaglin D. C., Mosteller F., Tukey J. W. *Understanding Robust and Exploratory Data Analysis*. NY, Wiley-Interscience, 2000. 447 p.
11. Flach P. *Machinnoe obuchenie. Nauka i isskustvo postroeniya algoritmov, kotorye izvlekayut znaniya iz dannyh* [Machine Learning. The Art and Science of Algorithms that Make Sense of Data]. Transl. from Eng. by A.A. Slinkin. Moscow, DMK Press, 2015. 400 p.
12. Chollet F. *Glubokoe obuchenie na Python* [Deep Learning with Python]. Seriya «Biblioteka program-mista». SPb., Piter, 2018. 400 p.

К вопросу о реализации алгоритмов выявления внутренних угроз с применением машинного обучения¹

К. А. Гайдук, А. Ю. Исхаков

В работе представлен анализ алгоритмов и подходов, применяемых при решении задачи для выявления внутренних угроз с применением методов машинного обучения. Выявление внутренних угроз в контексте данного исследования сводится к решению задачи детектирования аномалий в журналах аудита действий субъектов доступа. В статье формализованы основные направления выявления внутренних угроз и приведены популярные алгоритмы машинного обучения. В работе поднимается проблема объективной оценки результатов исследований и разработок в данной предметной области. На основании проведенного анализа разработаны рекомендации по реализации систем выявления внутренних угроз с помощью алгоритмов машинного обучения.

Ключевые слова: внутренние угрозы информационной безопасности, машинное обучение, поиск аномалий, аутентификация, изоляционный лес, ансамблевые методы.

1. Введение

Внутренние угрозы можно определить как любые потенциально опасные для организации действия субъекта (инсайдера). К их числу относятся несанкционированная передача данных, нарушение целостности ресурсов и другие злонамеренные или непреднамеренные действия. Задача выявления таких угроз усложняется тем, что инсайдеры способны тщательно скрывать следы и пытаться моделировать нормальное поведение. В связи с этим для эффективного решения задачи необходимо проанализировать большой объем данных системных журналов, зачастую в режиме реального времени. Внутренние угрозы принято разделять на две категории [1]: умышленные (злонамеренные) и непреднамеренные (пассивные). Пассивная внутренняя угроза происходит, когда сотрудник неосознанно предоставляет доступ злоумышленнику, игнорируя политику безопасности или пользуясь ее недостатками, посещая фишинговые сайты, переправляя конфиденциальные данные на личную электронную почту и т.д. Злонамеренные угрозы исходят от лиц, которые осознанно используют свой доступ к ресурсам компании, чтобы модифицировать, уничтожить или собирать конфиденциальную информацию в личных целях.

Подходы к обнаружению внутренних угроз можно разделить на три направления: на основе правил, на основе графов и на основе методов машинного обучения [2]. Подход, основанный на применении методов машинного обучения, получил широкое применение благодаря своему мощному математическому аппарату и высокой эффективности [3]. В контексте

¹ Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 21-71-00125 «Алгоритмическое обеспечение для усиленной проверки подлинности субъектов доступа в критически важных объектах».

внутренних угроз машинное обучение используется для создания моделей, идентифицирующих угрозы и статистически определяющих подозрительное поведение. Классификация методов решения задачи выявления внутренних угроз не может быть однозначной, так как количество этих методов постоянно растет и повторно анализируется в совокупности. Более подробная классификация приведена в [4].

Целью данной работы является исследование тенденций применения методов машинного обучения в реализации алгоритмического обеспечения для выявления внутренних угроз. Для этого предлагается: провести систематизацию основных подходов; провести обзор современных исследований в этой области; выделить проблемные области, с которыми сталкиваются разработчики подобных систем.

2. Подходы к построению систем выявления внутренних угроз

В контексте машинного обучения задача выявления внутренних угроз формулируется как задача обнаружения аномалий, которые в зависимости от методов способны выявить как атаки по известному сценарию, так и новые типы атак [5]. Выявление аномалий – это обнаружение выбросов, редких событий и наиболее отличающихся значений в наборе данных. Задача выявления атак по известному сценарию чаще решается эффективнее и быстрее, но вместе с этим эти сценарии необходимо непрерывно обновлять, что создает зависимость от экспертной оценки.

Система выявления аномалий должна обрабатывать большие объемы информации, зачастую это системные и сетевые журналы, отображающие действия пользователей. Методы машинного обучения получают на вход преобразованные в вектор признаков данные и обучаются на них, чтобы затем принять решение, является ли такой вектор признаков аномальным. Таким образом, задача выявления аномалий ставит ряд вопросов о выборе парадигмы обучения, конкретного метода и вопрос представления данных.

Первый вопрос для специалистов – это выбор формата данных, в которых будет осуществляться поиск внутренних угроз. Понимание специфики работы отслеживаемой системы необходимо для выбора достоверного источника данных, который зачастую представляет собой журналы активности пользователей, собранные из различных источников.

Предварительная обработка данных также является неотъемлемой частью анализа данных, целью которого является удаление нежелательного шума в данных и, таким образом, уточнение интересующих характеристик данных. Более того, выбор оптимальных методов предварительной обработки может существенным образом повлиять на результаты анализа.

После того как данные поступают от источников в различной форме, их необходимо обработать и привести к единой форме. Во-первых, данные совмещаются из различных источников на основе идентификатора пользователя с учетом условия этого совмещения, например, какой-то период времени или количество действий. Так как данные поступают от разных источников с разным числом полей, их нужно привести к одному виду с помощью выделения наиболее релевантных.

Поскольку алгоритмы машинного обучения работают с числовыми данными, необходимо кодирование признаков для создания числовых векторов. Ошибки в процессе кодирования временных функций могут привести к тому, что модели машинного обучения неправильно интерпретируют корреляцию между ними. Например, при кодировании ограниченного числа категорий у признаков целыми числами алгоритмами машинного обучения это может восприниматься как отношение порядка, тогда как в реальности это не так, поэтому признаки разделяют на категориальные и порядковые.

После приведения данных к единому виду необходимо провести нормализацию данных, к задачам которой можно отнести сокращение объема данных, удаление повторных записей, противоречивых или некорректных данных. К алгоритму нормализации можно отнести метод синтетической переборки меньшинства (SMOTE), который позволяет сохранить

производительность при несбалансированном наборе классов в задаче классификации. Алгоритм заключается в выборе записи из класса меньшинства в качестве входных данных, выполняется поиск его k ближайших соседей и между этими точками генерируется одна или несколько новых записей.

После всех этапов обработки данные делятся на обучающую выборку, на которой алгоритм учится, и тестовую выборку для проверки точности модели.

Так как задача выявления аномалий относится к задачам классификации, то можно применить те же метрики для оценки качества модели, такие как точность (precision), полнота (recall), F -мера и анализ ROC-AUC-кривой.

Таким образом, обобщение процесса построения систем выявления внутренних угроз, основанных на методах машинного обучения, можно представить в виде концептуальной схемы на рис. 1.

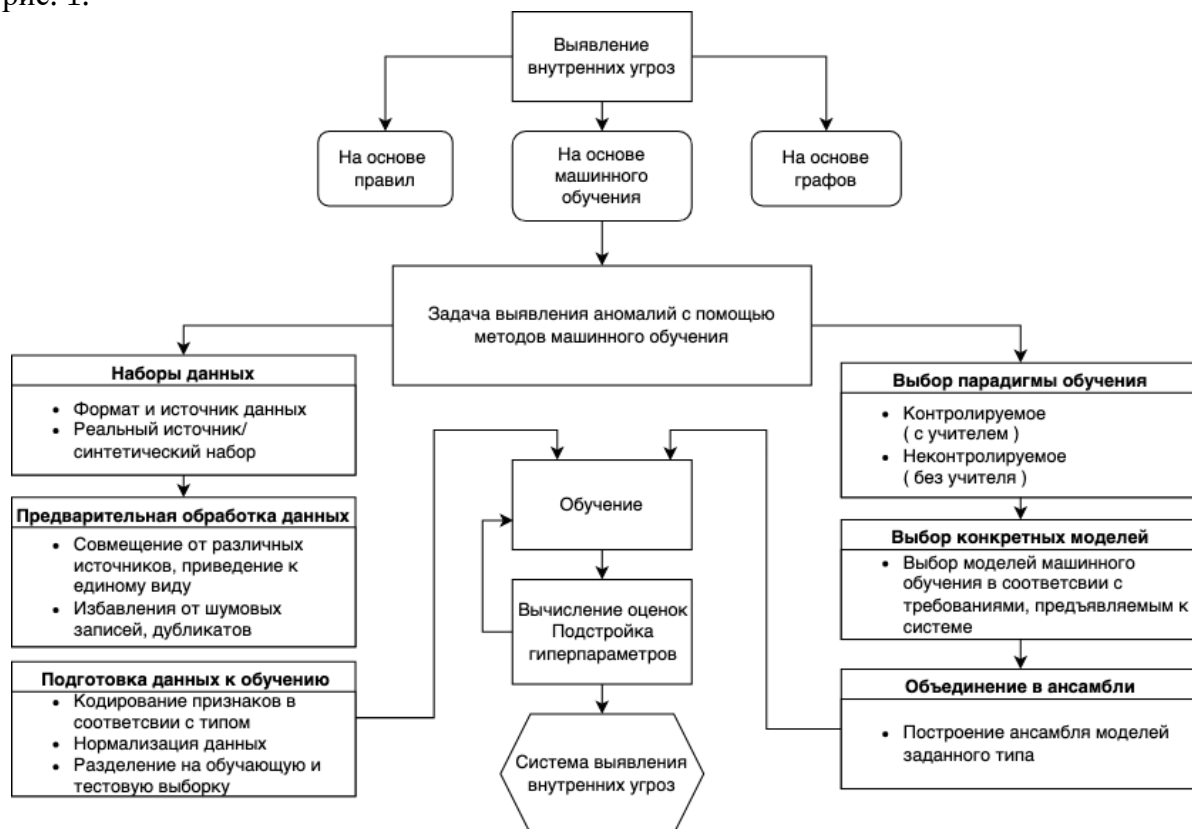


Рис.1. Схема построения системы выявления внутренних угроз

3. Методы машинного обучения, применяемые для решения задачи выявления внутренних угроз

3.1. Контролируемые и неконтролируемые методы поиска аномалий

В машинном обучении принято выделять два направления поиска аномалий: обнаружение выбросов и обнаружение новизны. Выбросы и новое поведение легко спутать, так как они являются объектами, отличающимися по своим свойствам от объектов обучающей выборки, именно поэтому важно правильно формулировать задачи для выбора методов и формировать обучающую выборку с учетом поставленных задач. В контексте выявления внутренних угроз стоит задача выявления выбросов, поэтому данные, на которых будет обучаться модель, должны обладать достаточной полнотой и описывать максимально большое множество «нормальных» поведения в системе.

Задача выявления атак по известному сценарию чаще решается эффективнее и быстрее, но вместе с этим сценарию необходимо непрерывно обновлять, что будет создавать зависимость от экспертной оценки.

В машинном обучении существует две парадигмы: контролируемые (с учителем) и неконтролируемые методы (без учителя), которые отличаются способом представления обучающих данных.

В контролируемых методах обучение происходит с заранее помеченными целевыми данными, когда заранее известно, являются ли действия вредоносными или не являются, тем самым увеличивая точность обнаружения.

Одним из наиболее популярных контролируемых методов является метод k ближайших соседей (KNN), который используется для задач классификации [6].

Этот метод настраивает информацию о соседних точках для классификации выходных меток. Данный метод широко используется в области безопасности, например, для обнаружения вторжений и обнаружения спама и вредоносных программ [7]. Как правило, алгоритм KNN выбирает ближайшие выборки на основе измерения расстояния между всеми выборками обучающей выборки и новыми выборками. Он имеет возможность прогнозировать целевой класс более простым способом и с высокой точностью и демонстрирует значительную производительность при зашумленных обучающих данных или массивном наборе данных.

Неконтролируемые методы имеют дело с неразмеченными данными, обучение которых обычно требует более длительного времени и меньшей точности за счет выявления любых аномальных действий, не обязательно несущих угрозу. Наибольшее применение из неконтролируемых методов получили одноклассовый метод опорных векторов (OSVM) и изоляционный лес (IF).

Метод опорных векторов (SVM) изначально был разработан как алгоритм классификации двух или более классов, который находит максимальную границу, разделяющую классы, и является контролируемым алгоритмом [8]. Разработанный алгоритм был способен работать только с линейно разделимыми классами, однако получил большую популярность с введением «Kerneltrick», который позволил эффективно работать с линейно неразделимыми данными. Такой подход потенциально позволяет получать бесконечномерные пространства признаков. «Kerneltrick» основан на идее, что линейно неразделимые признаки в заданном пространстве могут стать разделимыми в пространствах большей размерности.

Одноклассовый SVM предназначен для классификации выбросов в том случае, когда данные содержат только положительные точки [9], и может иметь лишь один класс. Общая идея состоит в преобразовании пространства признаков и разделении гиперплоскостью так, чтобы наблюдения были наиболее удалены от начала координат. Полученная граница разделяет близко расположенные наблюдения из выборки и аномальные значения. Таким образом, данный алгоритм обучается на «нормальных» данных и способен обучаться на неразмеченных данных.

Алгоритмы «деревья решений» являются наиболее часто используемыми методами машинного обучения. Решения раскладываются в древовидные структуры до тех пор, пока не будет принято решение об успешном предсказании. Данный класс алгоритмов получил свою популярность из-за достаточно большой скорости и точности при решении задач машинного обучения [10].

Одним из известных представителей деревьев решений является алгоритм «случайного леса», который заключается в использовании сразу нескольких решающих деревьев. В таком случае решение принимается на основе выходных данных от каждого дерева перед получением единственного ответа. Исходная выборка случайным образом делится на N подмножеств, на каждом подмножестве строится дерево решений для проверки соответствия одного или нескольких признаков. Для каждого ветвления в дереве выбирается несколько случайных признаков (для каждого ветвления свои признаки). Далее выбирается лучший признак и разветвление по нему, а дерево строится до исчерпания выборки – как правило, пока в листьях не останутся представители только одного класса.

Применительно к задаче выявления внутренних угроз используется алгоритм «Изоляционный лес» (Isolationforest, IF) (рис. 2) [11]. Основываясь на принципе, что примеры аномалий редки и значительно отличаются по значениям атрибутов от нормальных точек данных, IF разработан как ансамбль «деревьев изоляции», при этом предполагается, что аномалии, которые легче изолировать, находятся ближе к корням деревьев, чем нормальные экземпляры.

Этот алгоритм отличается от других методов обнаружения аномалий, которые строят модели (в основном) нормальных данных и определяют аномалии как любые экземпляры, не соответствующие модели. Каждое дерево в IF работает на подмножестве обучающих данных и наборе признаков. В каждом узле дерева генерируются двоичные разбиения по случайно выбранному признаку и значению разбиения. Процесс рекурсивно повторяется до тех пор, пока каждый экземпляр не будет изолирован от других. После обучения всех деревьев изоляции балл аномалии экземпляра данных рассчитывается как средняя длина пути от корневых узлов до соответствующих листьев экземпляра в деревьях [12].

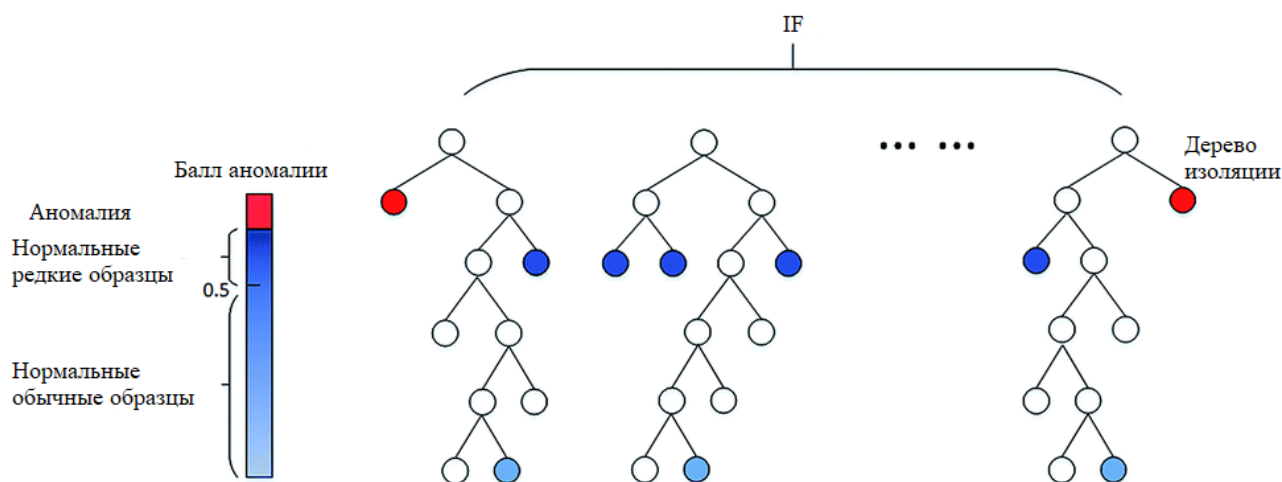


Рис. 2. Схема изоляционного леса

При правильном подборе количества деревьев и достаточно большой выборке данных алгоритм способен выявлять аномалии намного быстрее. Изначально разделяющие линии могут быть горизонтальными и вертикальными, что может существенно хуже работать на некоторых наборах данных. Для решения данной проблемы применяют модификацию расширенного изоляционного леса, который заключается в случайном выборе наклона ветви и точки пересечения [13].

В обоих случаях к обучающим данным предъявляется ряд требований для эффективной работы моделей, в то время как представление данных для модели может по-разному влиять на контролируемые и неконтролируемые модели.

Описанные выше модели машинного обучения являются не единственными, но наиболее популярными в контексте выявления аномалий. Неконтролируемые методы выявления аномалий работают в предположении, что большая часть данных нормальна, что позволяет в автоматическом режиме выявить нерегулярное и неестественное поведение пользователей. Например, одноклассовый SVM зачастую способен обучаться только на нормальных данных, что полезно в случае нехватки аномальных экземпляров данных, когда аномальное поведение в системе минимально. Изоляционный лес, напротив, способен выявлять аномалии с первых итераций своей работы и эффективен только при наличии аномалий в наборе данных, то есть, когда мы точно знаем, что в системе присутствуют аномалии.

Контролируемые методы требуют заранее помеченных данных, что усложняет процесс предварительной обработки и накладывает ограничения на применение в некоторых системах, в то время как такие методы способны выявлять более «трудные» аномалии и обнаруживать даже тщательно скрытое аномальное поведение. Алгоритм k ближайших соседей способен эффективно работать в случае системы с большим количеством атрибутов с большой точностью,

а также может применяться для обработки данных, дополняя или восстанавливая данные в случае использования метода для регрессии.

3.2. Ансамблевые методы

При выявлении угроз с помощью алгоритмов машинного обучения основной задачей исследователя является минимизация ошибок первого и второго рода. При классификации объекта как «нормальный» или «аномальный» с помощью его признаков и используя конкретную модель машинного обучения специалисты сталкиваются с типичными недостатками и ошибками этой модели. Объединив несколько таких моделей (обычно называемых «слабыми»), обучая их для решения одной и той же задачи, получают ансамбль методов.

Основная гипотеза ансамблевых методов состоит в том, что при определенном сочетании слабых моделей можно получить более точные, «сильные» модели. Под слабыми моделями понимают те, для которых точность может быть чуть выше случайного угадывания, в то время как сильные модели позволяют добиться в теории произвольно малой ошибки [14].

Существует множество ансамблевых методов как для определенных моделей, так и для общих принципов построения ансамблей. Наиболее популярными являются стекинг (суммарное обобщение), бэггинг (настройка с объединением) и бустинг (улучшение).

Бэггинг (от англ. Bootstrap Aggregation) обучает модели на разных подмножествах исходного обучающего множества независимо, в отличие от стэкинга (от англ. Stacked Generalization – стековое обобщение), который обучает принципиально различные модели на двух частях исходного обучающего множества: на первом модели обучаются, на втором проверяется их работа, затем выходы от моделей используются в качестве входных данных для мета-модели. Для задач классификации, к которым можно отнести выявления аномалий, наибольшую популярность получил бустинг.

Бустинг (от англ. boosting – улучшение) – это последовательный алгоритм композиции слабых моделей машинного обучения, реализующий сильную модель. Каждая последующая модель в композиции стремится компенсировать недостатки композиции предыдущих моделей. Важно отметить, что используемые модели в композиции должны быть действительно слабыми для улучшения общей модели в результате композиции.

Одним из первых алгоритмов бустинга является AdaBoost (сокращение от adaptive boosting), который также использует композицию слабых моделей. Обучающая выборка на каждой итерации композиции определяется исходя из ошибок на предыдущих итерациях, то есть ошибка используется как вес для обучающих данных таким образом, что большие веса присваиваются тем примерам, на которых ошибались предыдущие модели.

Для решения проблем адаптивного бустинга на основе этого алгоритма появилось обобщение – градиентный бустинг (GBM). Градиентный бустинг определяет слабые модели на основе градиентов функции потерь, которая является мерой отклонения выходных значений модели от реального значения. Таким образом, задача формулируется как обучение с учителем, а именно, необходимо выбрать функцию потерь и минимизировать ее с помощью градиентных методов. В разных задачах используются разные функции потерь, и от ее выбора зависит качество всей модели.

Одним из популярнейших на сегодняшний день алгоритмов градиентного бустинга является XGBoost (от англ. eXtreme Gradient Boosting), который работает с деревьями решений в качестве слабых моделей и представлен в виде программной библиотеки с открытым исходным кодом для большинства языков программирования. Так же, как и в общей идее градиентного бустинга, на каждой итерации вычисляется отклонение (значение целевой функции) уже обученного ансамбля на обучающей выборке. Следующая композиция добавляется в модель с целью предсказания этих отклонений и уменьшения среднего отклонения всей модели. Новые модели будут добавляться до тех пор, пока ошибка уменьшается (достаточный положительный градиент) либо пока не выполнится одно из правил досрочной остановки.

3.3. Наборы данных

В настоящее время не существует общедоступного набора реальных данных для обнаружения внутренних угроз, поэтому исследователи в своих работах применяют синтетически сгенерированные данные. Большинство наборов представляют собой данные в формате csv, строки которых представляют записи – обычно это дата, время, информация о пользователе или устройстве и непосредственно действие в системе.

Один из первых таких наборов был представлен в 1998 году лабораторией Линкольна Масачусетского технологического института для программы оценки обнаружения вторжений DARPA [15]. Этот набор представляет собой около пяти миллионов записей TCP-соединений за семь недель работы системы.

Набор данных RUU был собран Малеком Бен Салемом с 34 компьютеров под управлением операционной системой Windows. Этот набор включает в себя действия в системе, реестр Windows, доступ к файловой системе, запущенные процессы и используемые динамические библиотеки [16].

Набор данных TWOS [17] был собран из реальных взаимодействий пользователя с хост-машиной. Набор был собран во время конкурса, организованного Сингапурским университетом технологии и дизайна в марте 2017 года, и включает в себя данные, собранные из шести источников данных (нажатия клавиш, мышь, монитор хоста, сетевой трафик, журналы SMTP и вход в систему), а также дополнительные психометрические данные.

Одним из самых популярных наборов данных является CERT [18], который был создан Институтом программной инженерии Университета Карнеги-Меллона. Это «свободный от ограничений конфиденциальности» [19] набор, разработанный, чтобы позволить исследователям, изучающим тему внутренних угроз, экспериментировать и оценивать предлагаемые ими решения. Он имеет несколько различных версий, данные в каждой версии генерируются с использованием различных сценариев. Каждый набор данных содержит журналы данных входа в систему, HTTP или историю просмотров, электронную почту, журналы доступа к файлам, использование устройств, данные LDAP, а также дополнительную психометрическую информацию.

В рамках исследования был проведен обзор существующих наборов данных, в том числе частоты и особенности их применения исследователями. Проведенный анализ позволил выявить подходы к составлению наборов и основные признаки, что подтвердило неоднозначность решения проблемы выявления внутренних угроз.

Из проведенного анализа однозначно можно выделить проблемы отсутствия реальных наборов из-за вопросов конфиденциальности и отсутствия унификации среди различных наборов данных.

4. Результаты анализа современных исследований и рекомендации к системам выявления внутренних угроз

На сегодняшний день проводится целый ряд научных исследований, в которых предлагается различное методическое и алгоритмическое обеспечение для задачи обнаружения внутренних угроз в действиях пользователей. В большинстве публикаций предлагаются подходы к агрегации, корреляции и нормализации событий в журналах аудита, а также оптимизации известных алгоритмов машинного обучения с целью достижения лучших показателей работы систем обнаружения угроз. Оценку работы методов в известных публикациях стараются проводить на общеизвестных наборах данных. Одним из наиболее популярных и полным по своей структуре является набор CERT [18].

В связи с этим в данной работе с целью проведения объективного сравнения был также выбран набор данных CERT с заданным набором признаков. Проведенный анализ свидетельствует о том, что в зависимости от версии данного набора он содержит разное количество записей и внутренних угроз, но структура данного набора остается единой и содержит 5 разделенных таблиц: данные HTTP, EMAIL, данные входа и выхода в систему, действия с файлами, данные о подключениях устройств. В каждой из таблиц содержится информация о пользователе, идентификаторе действия, дате и времени и другие поля, специфичные для данной таблицы.

Ниже представлен анализ результатов, полученных в некоторых публикациях с набором данных CERT. Прежде всего, следует отметить результаты с разными методами кодирования и предварительной обработки. В [20] авторы сравнивают алгоритмы логистической регрессии (LR), деревьев решений (DT), случайного леса (RF), KernelSVM (KSVM) и k ближайших соседей (KNN) на наборе CERT r4.2. В работе применяются методы масштабирования переменных и метод синтетической переборки меньшинства. Используя эти методы в отдельности, авторы сравнивают полученные оценки: F -меру, точность и полноту (табл. 1, 2).

Таблица 1. Сравнение оценок для исходных и масштабированных данных [20]

Алгоритм	Точность		Полнота		F -мера	
	Исходные	Масштаб	Исходные	Масштаб	Исходные	Масштаб
DT	0.67	0.67	0.74	0.74	0.71	0.71
RF	0.60	0.58	0.19	0.19	0.29	0.29
KNN	0.13	0.84	0.01	0.21	0.02	0.32
KSVM	0.00	1.00	0.00	0.15	0.00	0.27

Из табл. 1 видно, что методы KSVM и KNN неустойчивы к ненормированным данным, поэтому их оценки увеличиваются при масштабировании данных, в то время как оценки других методов изменяются незначительно.

Таблица 2. Сравнение оценок для исходных и сбалансированных данных методом синтетической переборки меньшинства данных [20]

Алгоритм	Точность	Полнота	F -мера
<i>Без использования метода SMOTE</i>			
LR	1.00	0.15	0.26
DT	0.68	0.77	0.72
RF	0.39	0.32	0.35
KNN	0.33	0.06	0.11
<i>С использованием SMOTE</i>			
LR	0.50	1.00	0.67
DT	0.99	0.99	0.99
RF	0.99	0.99	0.99
NB	0.77	0.95	0.85
KNN	0.98	0.99	0.98

Для такого сравнения авторы использовали метод синтетической переборки меньшинства (SMOTE): генерировали новые записи и сравнили обученные модели на исходном и дополненном множествах данных, закодированных методом «горячего кодирования». Как видно из табл. 2, у большинства методов оценки увеличились, что говорит об их неустойчивости к несбалансированности в данном случае. Справедливо заметить, что данное улучшение в работе моделей возможно только с заранее размеченными данными для возможности применить SMOTE.

В качестве финального результата авторами предлагается рис. 3, где по оси ординат отмечены методы, по оси абсцисс – методы кодирования (метод синтетической переборки меньшинства, метод «горячего кодирования», кодирование меток), а по оси аппликат – значение ROC-AUC.

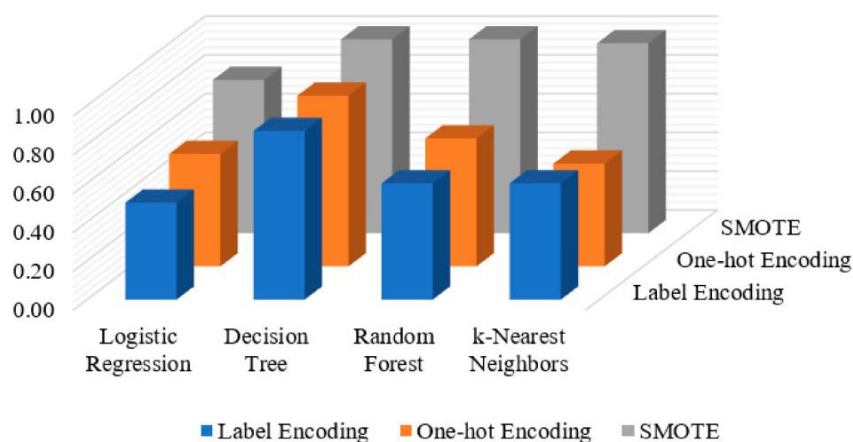


Рис. 3. Результат сравнительного анализа [20]

Таким образом, авторы называют методы деревьев решений и случайного леса наиболее надежными по сравнению с другими алгоритмами, что говорит об их преимуществе в условиях несбалансированности и зашумленности данных.

В работе [21] также используется синтетическая переборка меньшинства и сравниваются метод XGBoost и метод случайного леса на наборе CERT r6.2. Из анализа табл. 3 можно видеть очевидное преимущество метода XGBoost перед методом случайного леса, что также подтверждает тот факт, что ансамблевые методы имеют большую эффективность при оптимальной настройке гиперпараметров.

Таблица 3. Сравнение оценок для двух моделей

Метод	Accuracy(10)	Точность	Полнота	F-мера
RandomForest	77.10 %	86.82 %	90.41 %	88.58 %
XGBoost	99.13 %	98.34 %	98.21 %	98.27 %

Отмечается, что в публикациях часто сравнивают методы машинного обучения и искусственные нейронные сети. Например, в [22] сравниваются методы случайного леса (RF), которые используют алгоритм CART (деревья классификации и регрессии с учетом индекса «Джинни»), логистическая регрессия (LR) и искусственная нейронная (ANN) сеть прямого распространения с тремя скрытыми слоями, для которой применяется алгоритм оптимизации ADAM. Авторы используют наборы данных CERT r5.1 и CERT r6.2 и сравнивают алгоритмы на них. В работе также сравниваются два подхода к выявлению угроз – выявление угроз по конкретному экземпляру (записи) и выявление угрозы по пользователю. В качестве параметров оценки качества выбраны полнота и точность (табл. 4).

Таблица 4. Сравнение оценок для разных представлений данных

Алгоритм	Полнота (Recall)	Точность (Precision)
<i>На основе экземпляров</i>		
LR	0.5752	0.171
RF	0.4642	0.994
ANN	0.4676	0.391

<i>На основе пользователей</i>		
Алгоритм	Полнота (Recall)	Точность (Precision)
LR	0.9323	0.284
RF	0.6954	0.996
ANN	0.7815	0.532

Из табл. 4 видно, что подход выявления внутренних угроз на основе действий пользователя, а не всех действий в отдельности дает большое преимущество. В результате авторы выделяют RF и ANN как модели, показывающие лучшие результаты, и рекомендуют использовать RF в случае ограниченного набора данных с большей точностью, с другой стороны, использование ANN дает больший параметр полноты.

В табл. 5 представлен сравнительный обзор, систематизирующий результаты исследований, посвященных задаче выявления внутренних угроз. Были взяты максимальные оценки, полученные авторами с использованием наборов данных CERT разных версий. Стоит отметить, что во всех перечисленных работах размер обучающей выборки разнится, к тому же зачастую записи объединяются в одну за промежуток времени, что объясняет разность некоторых результатов.

Таблица 5. Сравнительный анализ современных исследований

Ссылка	Набор данных	Оценки для моделей			Описание
[22]	r4.2, r6.2	<i>AUC</i>	<i>Recall</i>	<i>Accuracy</i>	Используется сразу два набора данных, которые модифицировались и объединялись для большей производительности. В работе строятся ансамбли из моделей при помощи голосования большинства. В работе предлагаются и другие ансамбли с нечётным количеством модели, приведена оценки для лучшего ансамбля. Отмечается чувствительность SVM к классификаторам.
		One-class SVM			
		0.95	1	0.265	
		Изоляционный лес			
		0.596	0.025	0.958	
		HMM+LOF+SVM:			
		0.966	1	0.909	
[23]	r4.2	<i>AUC</i>	<i>PR</i>		Определяется показатель доверия для пользователя за период времени. Сравняется эффективность моделей за разные периоды, и для последующих периодов учитывается показатель доверия за предыдущий период.
		One-class SVM			
		0.97	0.96		
		Изоляционный лес			
		0.91	0.97		
[24]	r4.1, r4.2	<i>Accuracy</i>	<i>Среднеквадратичная ошибка</i>		Применяется метод нормализации. Сравняются модели, обученные несколько раз и один раз на всём наборе данных, в результате отличий не
		Случайный лес			
		0.8975	0.2604		
		Наивный байесовский классификатор			
		91.966	0.2576		

		Модель 1 ближайшего соседа				выявлено. Сравниваются средняя и среднеквадратичная ошибки методов.	
		94.682		0.2115			
[10]	r4.2, r6.2, другие	<i>AUC</i>		<i>Время обучения, с</i>	<i>Время прогноза, мс</i>	Сравниваются разные временные представления данных и представления на основе пользователей и экземпляров. Сравнение моделей в условиях «отравления» данных, с разным числом пользователей и периодом. Комбинирование показателей обнаружения с помощью ансамблей.	
		Нейронная сеть «Автокодировщик»					
		0.936		200			<1
		LOF					
		0.768		472			13
		Изоляционный лес					
		0.744		40			<1.25
		LODA					
		0.863		20		<1	
[25]	r6.2	<i>PR</i>	<i>Recall</i>	<i>F-мера</i>	<i>AUC</i>	Предложена стратегия обработки данных для решения несбалансированности и сравнение результатов с исходным набором и синтетически дополненным с помощью алгоритма SMOTE. Приведены оптимальные параметры обучения.	
		Случайный лес					
		0.9678	0.7852	0.8669	0.8581		
		Случайный лес + SMOTE					
		0.9784	0.8626	0.9168	0.8916		
		XGboost					
		0.9857	0.8292	0.9	0.9178		
		XGboost + SMOTE					
		0.9951	0.9816	0.9883	0.9687		
[26]	r5.2, r6.2	<i>FPR</i>	<i>TPR</i>	<i>Precision</i>	<i>F-мера</i>	В работе делается акцент на сравнение различных вариаций обучающего множества: представление данных по пользователям или по записям, разные периоды времени, идеальные и реальные условия (разбиение данных на обучающее и тестовое множества). Используется несколько наборов данных с различными сценариями для проверки обобщающей способности.	
		Логистическая регрессия					
		0.0775	0.9154	0.2817	0.43		
		Многослойный перцептрон					
		0.0282	0.77	0.49	0.59		
		Случайный лес					
		0.0043	0.81	0.88	0.8442		
		XGboost					
		0.001	0.82	0.75	0.7825		
[27]	r5.2	<i>TPR</i>	<i>PR</i>	<i>F-мера</i>	<i>Время обучения, с</i>	Использование разного шага по времени, трех разных подходов для нормализации данных, разные подходы к представлению данных.	
		Логистическая регрессия					
		0.8815	0.361	0.51	60.86		
		Случайный лес					
		0.85	0.7956	0.8156	42.17		
		Многослойный перцептрон					
		0.9507	0.2756	0.4252	378.58		

Обозначения: PR – Precision (точность), HMM – скрытые марковские модели, LOF – локальный коэффициент выбросов, LODA – легкий интерактивный детектор аномалий.

Анализируя результаты публикаций при оценке базовых алгоритмов следует учитывать отсутствие единого подхода к проведению исследований у авторов в части предварительной обработки данных и настройки гиперпараметров, в связи с чем результаты различных коллективов отличаются. Эффективность подавляющего большинства базовых методов зависит от обработки набора данных: масштабирования, совмещения, разбиения на разные временные отрезки, баланса между классами и т.д. Ансамблевые методы в меньшей мере зависят от такой обработки, и в различных условиях такие методы обладают большей эффективностью в отличие от применения моделей отдельно [28].

Из анализа публикаций невозможно определить явного лидера из-за разности в условиях проведения экспериментов и оценки, однако результаты свидетельствуют о том, что методы изоляционного леса, случайного леса и одноклассовый метод опорных векторов более эффективны для использования отдельно. XGBoost и ансамблевые модели в целом позволяют улучшить эффективность практически любой модели, но также требуют тщательного подбора параметров.

На основе анализа публикаций можно выделить некоторые рекомендации для решения задачи выявления внутренних угроз:

1. Представление и обработка данных главным образом влияет на производительность любой модели, поэтому в данном случае следует уделять особенное время данному классу методов. В вопросе выбора данных большее значение имеет актуальность данных, включая систему учета прошлого опыта с сохранением периодичности и масштаба.

2. Система на основе моделей машинного обучения должна постоянно обучаться на основе журналов системы и предоставлять наглядные данные с сохранением корреляций для упрощения предупреждения и расследования инцидентов безопасности.

3. Выбор оценок для системы выявления внутренних угроз должен зависеть от поставленных задач и критичности инфраструктуры – это можно отнести к четкому пониманию архитектуры такой системы и привлечению специалистов.

4. Неконтролируемые модели машинного обучения помогают избавиться от высокой стоимости обслуживания такой системы, в то время как контролируемые методы обладают большей точностью и надежностью и оправдывают свои затраты. Невозможно добиться полной независимости от экспертной оценки на всем этапе функционирования системы выявления внутренних угроз, поэтому целесообразно использовать оба подхода к обучению моделей.

5. Надежная и эффективная система выявления внутренних угроз должна использовать комбинацию нескольких независимых моделей, объединяя их с помощью ансамблевых методов, которые, как показано на практике, превосходят любую отдельно взятую модель.

5. Заключение

Выявление внутренних угроз остается одной из самых сложных задач обеспечения безопасности для любой организации. В данной области значительные результаты принадлежат исследованиям применимости моделей на основе машинного обучения. Рассмотренные работы с помощью новейших подходов решают данную проблему эффективнее, чем классические подходы, что подтверждается практическими результатами.

При этом отсутствие единых критериев оценки и проблемы с воспроизводимостью результатов, которые вызваны недоступностью широкому кругу исследователей унифицированных наборов данных, порождает дополнительные вопросы и вызовы для современных ученых. В данной работе была сформулирована задача выявления внутренних угроз, также приведен анализ наиболее популярных контролируемых и неконтролируемых моделей на основе машинного обучения, описаны наборы данных и методы их обработки, необходимые для успешного решения поставленной задачи. Представлена систематизация существующих научных результатов и приведены рекомендации по реализации систем выявления внутренних угроз.

Описание, обзор, анализ и сравнение результатов по современным публикациям вместе с приведенными рекомендациями дает понимание современного состояния данной области исследований и задает направление для практических реализаций.

Исходя из анализа, можно выделить основные тенденции современных разработок, подтверждающие, что наиболее перспективным направлением в области выявления внутренних угроз являются искусственные нейронные сети, которые все чаще применяются в контексте решения рассматриваемых задач. Вместе с рассмотрением архитектур нейронных сетей необходимо учитывать специфику их работы, вопросы производительности и возможность реального применения в системах выявления внутренних угроз. Анализ этих и других вопросов, связанных с применением искусственных нейронных сетей в задаче выявления внутренних угроз, планируется посвятить дальнейшие исследования.

Литература

1. Kim A., Oh J., Ryu J., Lee K. A Review of Insider Threat Detection Approaches with IoT Perspective // IEEE Access. 2020. V. 8. P. 78847-78867.
2. Kim J., Park M., Kim H., Cho S., Kang P. Insider Threat Detection Based on user Behavior Modeling and Anomaly Detection Algorithms // Appl. Sci. 2019. V. 9, 4018.
3. Alpaydin E. Introduction to Machine Learning. MIT Press: Cambridge, MA, 2014.
4. Al-Mhiqani M. N. et al. A review of insider threat detection: Classification, machine learning techniques, datasets, open challenges, and recommendations // Applied Sciences. 2020. V. 10, № 15. P. 5208.
5. Al-Mhiqani M. N. et al. A new intelligent multilayer framework for insider threat detection // Computers & Electrical Engineering. 2022. V. 97. P. 107597.
6. Rajaguru H., Chakravarthy S. R. S. Analysis of decision tree and k-nearest neighbor algorithm in the classification of breast cancer // Asian Pacific journal of cancer prevention: APJCP. 2019. V. 20, № 12. P. 3777.
7. Sarma M. S. et al. Insider threat detection with face recognition and KNN user classification // IEEE International Conference on Cloud Computing in Emerging Markets (CCEM). 2017. P. 39–44.
8. Chauhan V. K., Dahiya K., Sharma A. Problem formulations and solvers in linear SVM: a review // Artificial Intelligence Review. 2019. V. 52, № 2. P. 803–855.
9. Khan S. S., Madden M. G. One-class classification: taxonomy of study and review of techniques // The Knowledge Engineering Review. 2014. V. 29, № 3. P. 345–374.
10. Buczak A. L., Guven E. A survey of data mining and machine learning methods for cyber security intrusion detection // IEEE Communications surveys & tutorials. 2015. V. 18, № 2. P. 1153–1176.
11. Le D. C., Zincir-Heywood N. Anomaly detection for insider threats using unsupervised ensembles // IEEE Transactions on Network and Service Management. 2021. V. 18, № 2. P. 1152–1164.
12. Sadaf K., Sultana J. Intrusion detection based on autoencoder and isolation forest in fog computing // IEEE Access. 2020. V. 8. P. 167059–167068.
13. Hariri S., Kind M. C., Brunner R. J. Extended isolation forest // IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering. 2019. V. 33, № 4. P. 1479–1489.
14. Zhang C., Ma Y. (ed.). Ensemble machine learning: methods and applications. Springer Science & Business Media, 2012. P. 1–35.
15. Jisa D., Thomas C. Efficient DDoS flood attack detection using dynamic thresholding on flow-based network traffic // Computers & Security. 2019. V. 82. P. 284–295.
16. Song Y. et al. System level user behavior biometrics using Fisher features and Gaussian mixture models // IEEE Security and Privacy Workshops. 2013. P. 52–59.

17. *Harilal A. et al.* The Wolf Of SUTD (TWOS): A Dataset of Malicious Insider Threat Behavior Based on a Gamified Competition // *J. Wirel. Mob. Networks Ubiquitous Comput. Dependable Appl.* 2018. V. 9, № 1. P. 54–85.
18. *Lindauer B.* Insider Threat Test Dataset. Carnegie Mellon University. Dataset. [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/10.1184/R1/12841247.v1> (дата обращения: 23.10.2022).
19. *Glasser J., Lindauer B.* Bridging the gap: A pragmatic approach to generating insider threat data // *IEEE Security and Privacy Workshops*. 2013. P. 98–104.
20. *Al-Shehari T., Alsowail R. A.* An Insider Data Leakage Detection Using One-Hot Encoding, Synthetic Minority Oversampling and Machine Learning Techniques // *Entropy*. 2021. V. 23, № 10. P. 1258.
21. *Jiang W. et al.* An insider threat detection method based on user behavior analysis // *International Conference on Intelligent Information Processing*. Springer, Cham, 2018. P. 421–429.
22. *Bartoszewski F. W. et al.* Anomaly Detection for Insider Threats: An Objective Comparison of Machine Learning Models and Ensembles // *IFIP International Conference on ICT Systems Security and Privacy Protection*. Springer, Cham, 2021. P. 367–381.
23. *Aldairi M., Karimi L., Joshi J.* A trust aware unsupervised learning approach for insider threat detection // *IEEE 20th International Conference on Information Reuse and Integration for Data Science (IRI)*. 2019. P. 89–98.
24. *Dosh M.* Detecting insider threat within institutions using CERT dataset and different ML techniques // *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*. 2021. V. 9, № 2. P. 873–884.
25. *Zou S. et al.* Ensemble strategy for insider threat detection from user activity logs // *Computers, Materials and Continua*. 2020.
26. *Le D. C., Zincir-Heywood N., Heywood M. I.* Analyzing data granularity levels for insider threat detection using machine learning // *IEEE Transactions on Network and Service Management*. 2020. V. 17, № 1. P. 30–44.
27. *Ferreira P., Le D. C., Zincir-Heywood N.* Exploring feature normalization and temporal information for machine learning based insider threat detection // *Proc. 15th International Conference on Network and Service Management (CNSM)*, 2019. P. 1–7.
28. *Мещеряков Р. В., Исхаков А. Ю., Евсютин О. О.* Современные методы обеспечения целостности данных в протоколах управления киберфизических систем // *Тр. СПИИРАН*. 2020. № 19 (5). С. 1089–1122.

*Статья поступила в редакцию 05.11.2022;
переработанный вариант – 25.11.2022.*

Исхаков Андрей Юнусович

к.т.н., старший научный сотрудник ИПУ РАН (117997, Москва, ул. Профсоюзная, д. 65), тел. (495) 198-17-20, доб. 1625, e-mail: iskhakovandrey@gmail.com.

Гайдук Кирилл

студент МИФИ (115409, Москва, Каширское шоссе, д. 31).

Using machine learning techniques for insider threat detection

Andrey Y. Iskhakov

PhD, senior researcher, ICS RAS (65 Profsoyuznaya street, Moscow 117997, Russia), e-mail: iskhakovandrey@gmail.com.

Kirill A. Gaiduk

Student, National Research Nuclear University MEPhI. Moscow Engineering Physics Institute (31 KashirskoeShosse, Moscow, 115409)

This paper presents an analysis of algorithms and approaches used to solve the problem of identifying insider threats using machine learning techniques. Internal threat detection in the context of this research is reduced to the task of detecting anomalies in the audit logs of access subjects' actions. The paper formalizes the main directions of insider threats detection and presents popular machine learning algorithms. The paper raises the problem of objective evaluation of research and development in the subject area. Based on the analysis recommendations for the implementation of internal threat detection systems using machine learning algorithms are developed.

Keywords: internal threats to information security, machine learning, anomaly hunting, authentication, isolation forest, ensemble methods.

References

1. Kim A., Oh J., Ryu J., Lee K. A Review of Insider Threat Detection Approaches with IoT Perspective. *IEEE Acces.* 2020. v. 8. pp. 78847-78867.
2. Kim J., Park M., Kim H., Cho S., Kang P. Insider Threat Detection Based on user Behavior Modeling and Anomaly Detection Algorithms. *Appl. Sci.* 2019. v. 9, 4018.
3. Alpaydin E. *Introduction to Machine Learning*. MIT Press: Cambridge, MA, 2014
4. Al-Mhiqani M.N. et al. A review of insider threat detection: Classification, machine learning techniques, datasets, open challenges, and recommendations. *Applied Sciences*. 2020. v. 10, no. 15. p. 5208.
5. Al-Mhiqani M.N. et al. A new intelligent multilayer framework for insider threat detection. *Computers & Electrical Engineering*. 2022. v. 97. p. 107597.
6. Rajaguru H., Chakravarthy S.R.S. Analysis of decision tree and k-nearest neighbor algorithm in the classification of breast cancer. *Asian Pacific journal of cancer prevention: APJCP*. 2019. v. 20, no. 12. p. 3777.
7. Sarma M.S. et al. Insider threat detection with face recognition and KNN user classification. *2017 IEEE International Conference on Cloud Computing in Emerging Markets (CCEM)*. IEEE, 2017. pp. 39-44.
8. Chauhan V.K., Dahiya K., Sharma A. Problem formulations and solvers in linear SVM: a review. *Artificial Intelligence Review*. 2019. v. 52, no. 2. pp. 803-855.
9. Khan S.S., Madden M.G. One-class classification: taxonomy of study and review of techniques. *The Knowledge Engineering Review*. 2014. v. 29, no. 3. pp. 345-374.
10. Buczak A.L., Guven E. A survey of data mining and machine learning methods for cyber security intrusion detection. *IEEE Communications surveys & tutorials*. 2015. v. 18, no. 2. pp. 1153-1176.
11. Le D.C., Zincir-Heywood N. Anomaly detection for insider threats using unsupervised ensembles. *IEEE Transactions on Network and Service Management*. 2021. v. 18, no. 2. pp. 1152-1164.
12. Sadaf K., Sultana J. Intrusion detection based on autoencoder and isolation forest in fog computing. *IEEE Access*. 2020. v. 8. pp. 167059-167068.
13. Hariri S., Kind M.C., Brunner R.J. Extended isolation forest. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*. 2019. v. 33, no. 4. pp. 1479-1489.
14. Zhang C., Ma Y. (ed.). *Ensemble machine learning: methods and applications*. Springer Science & Business Media, 2012. pp. 1-35.
15. Jisa D., Thomas C. Efficient DDoS flood attack detection using dynamic thresholding on flow-based network traffic. *Computers & Security*. v. 82. 2019. pp. 284-295.
16. Song Y. et al. System level user behavior biometrics using Fisher features and Gaussian mixture models. *2013 IEEE Security and Privacy Workshops*. IEEE, 2013. pp. 52-59.
17. Harilal A. et al. The Wolf Of SUTD (TWOS): A Dataset of Malicious Insider Threat Behavior Based on a Gamified Competition. *J. Wirel. Mob. Networks Ubiquitous Comput. Dependable Appl.* 2018. v. 9, no. 1. pp. 54-85.
18. Lindauer B. *Insider Threat Test Dataset*. Carnegie Mellon University. Dataset, available at: <https://doi.org/10.1184/R1/12841247.v1> (accessed 23.10.2022).
19. Glasser J., Lindauer B. Bridging the gap: A pragmatic approach to generating insider threat data. *2013 IEEE Security and Privacy Workshops*. IEEE, 2013. pp. 98-104.
20. Al-Shehari T., Alsowail R.A. An Insider Data Leakage Detection Using One-Hot Encoding, Synthetic Minority Oversampling and Machine Learning Techniques. *Entropy*. 2021. v. 23, no. 10. p. 1258
21. Jiang W. et al. An insider threat detection method based on user behavior analysis. *International Conference on Intelligent Information Processing*. Springer, Cham, 2018. pp. 421-429.

22. Bartoszewski F.W. et al. Anomaly Detection for Insider Threats: An Objective Comparison of Machine Learning Models and Ensembles. *IFIP International Conference on ICT Systems Security and Privacy Protection*. Springer, Cham, 2021. pp. 367-381.
23. Aldairi M., Karimi L., Joshi J. A trust aware unsupervised learning approach for insider threat detection. *2019 IEEE 20th International Conference on Information Reuse and Integration for Data Science (IRI)*. IEEE, 2019. pp. 89-98.
24. Dosh M. Detecting insider threat within institutions using CERT dataset and different ML techniques. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*. 2021. v. 9, no. 2. pp. 873-884.
25. Zou S. et al. Ensemble strategy for insider threat detection from user activity logs. *Computers, Materials and Continua*. 2020.
26. Le D.C., Zincir-Heywood N., Heywood M.I. Analyzing data granularity levels for insider threat detection using machine learning. *IEEE Transactions on Network and Service Management*. 2020. v. 17, no. 1. pp. 30-44.
27. Ferreira P., Le D.C., Zincir-Heywood N. Exploring feature normalization and temporal information for machine learning based insider threat detection. *2019 15th International Conference on Network and Service Management (CNSM)*. IEEE, 2019. pp. 1-7.
28. Meshcheryakov R.V., Iskhakov A.Y., Evsyutin O.O. Sovremennyye metody obespecheniya tselostnosti dannykh v protokolakh upravleniya kiberfizicheskikh system [Modern methods for ensuring data integrity in control protocols of cyber-physical systems]. *SPIIRAN proceedings*. 2020. 19(5). p. 1089-1122.

Модель проводимости печатных графеновых пластин

А. Г. Черевко, И. В. Антонова, А. Г. Марьясов, А. А. Черевко

Разработана модель, объясняющая зависимость сопротивления проводящих графеновых пластин, полученных методом многослойной струйной печати, от поверхностного сопротивления слоя и числа слоёв. Печатная проводящая пластина графена является слоистой, что обусловлено методом изготовления пластины. Проведено сравнение результатов моделирования с экспериментальными результатами, полученными авторами. Пластины печатались двумя типами чернил: графеновыми чернилами (1) и графеновыми чернилами с полимерными добавками (2). Достоверность аппроксимации экспериментальных данных по поверхностной проводимости пластин, напечатанных первым и вторым типом не хуже 99.5 % и 98.5 %. соответственно. Модель позволила оценить эффективную толщину печатных слоев графена, образующих проводящую графеновую пластину. Рассмотрен механизм проводимости слоев.

Ключевые слова: проводимость, графен, чернила, 2D-печать, слоистость, 5G.

1. Введение

Графеновые печатные проводящие пластины на подложках из ткани, бумаги отличаются экологичностью и гибкостью. Такие слои могут наноситься и на биологические объекты, в частности, на кожу человека. Понятен интерес, проявляемый к таким пластинам со стороны разработчиков гибкой экологичной носимой электроники для интернета [1–4] и телеметрии [5]. Электросопротивление графеновых пластин является одним из решающих факторов, определяющих его применимость в этих областях, в частности, в области создания СВЧ-тракта для 5G-интерфейса интернета вещей.

2. Типы разработанных чернил для проводящих слоев

Рассмотрена печать проводящих пластин двумя типами водных растворов чешуек графена:

1. Водный раствор чешуек графена, полученных электрохимическим расслоением высокоориентированного пиролитического графита (HOPG). Далее полученная суспензия с частицами подвергалась ультразвуковой обработке, центрифугированию и другим видам обработки для дополнительного расслоения частиц до графеновых чешуек с толщиной 0.4–1.5 нм [6]

2. Водный раствор чешуек графена с полимерными добавками (PEDOT:PSS (Poly(3,4-ethylenedioxythiophene)) / poly(styrene sulfonate – 1.1 % по массе)). Добавление полимера PEDOT:PSS к частицам графена заметно увеличивает гибкость и растяжимость слоев.

Оптическое изображение и изображение, полученное атомно-силовым микроскопом (АСМ-изображение), напечатанных пластин первым и вторым способом не отличались (рис. 1), но характер зависимости поверхностного сопротивления слоев был различен [7] (рис. 2, 3). Такие чернила применялись нами для создания графеновых гибких антенн

диапазона 4G [8]. В работе [9] дан анализ применения подобных антенн в диапазоне сотовых операторов 5G и 6G.

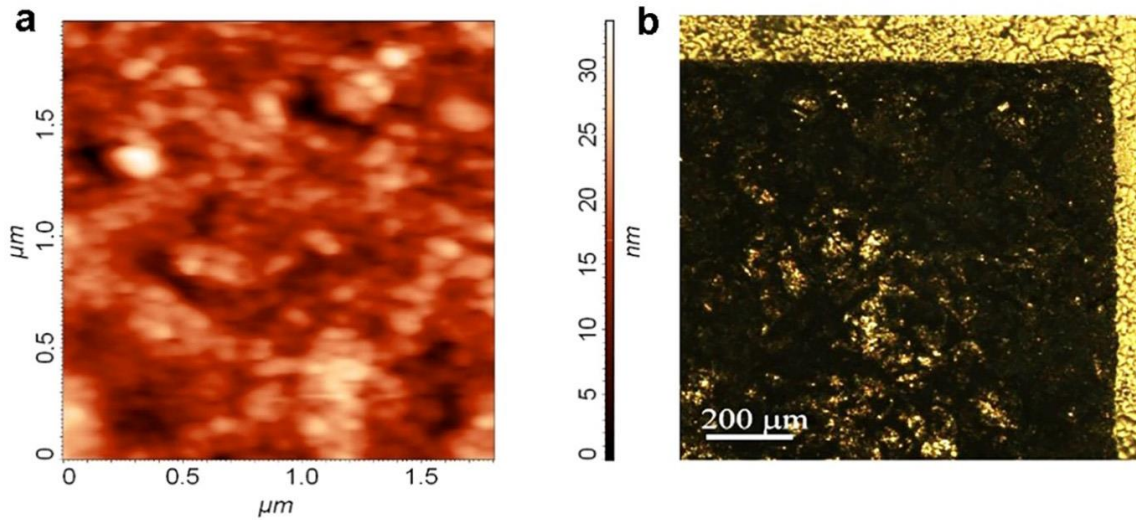


Рис. 1. АСМ-изображение (а) и оптическое изображение (б) графеновой проводящей пластины, напечатанной на фотобумаге

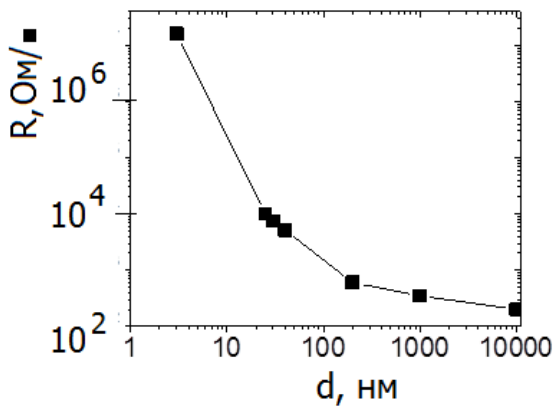


Рис. 2. Зависимость поверхностного сопротивления проводящей графеновой пластины от ее толщины. Печать водным раствором графеновых чешуек

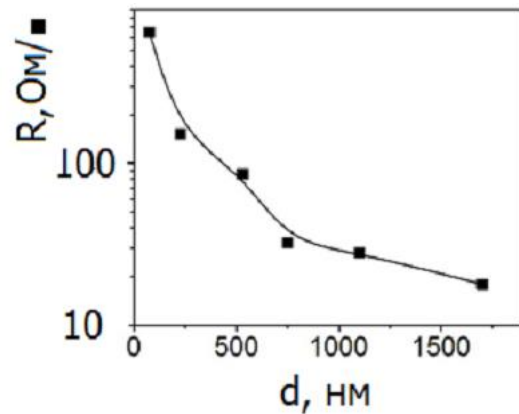


Рис. 3. Зависимость поверхностного сопротивления проводящей графеновой пластины от ее толщины. Печать водным раствором графеновых чешуек с полимерными добавками

3. Модель проводящей графеновой пластины, её эквивалентная схема

Как известно, печатные слои диэлектриков являются слоистыми [10]. Ожидаемо, что напечатанные проводящие графеновые пластины тоже могут иметь слоистую структуру [11]. Слоистость может привести к отличию поперечного сопротивления напечатанной пластины от продольного сопротивления и к нелинейности зависимости проводимости графеновой проводящей пластины от ее толщины.

Исходные характеристики модели проводящей графеновой пластины (ПГП):

- модель основана на экспериментальных данных по поверхностному сопротивлению ПГП;
- полагается, что пластина состоит из идентичных проводящих слоев с той же геометрией, что и пластина;
- существует одинаковое барьерное сопротивление R^* между слоями;

– полагается, что сопротивление между электродами при измерении поверхностного сопротивления пластины из одного слоя равно Ro ;

– рассматривается случай тонких слоев, когда их толщина d много меньше расстояния между электродами для измерения поверхностного сопротивления b : $d \ll b$. При этих условиях собственное поперечное сопротивление слоя $R_L \ll Ro$. Рассматриваются слои, достаточно тонкие, чтобы их поперечное сопротивление было меньше барьерного сопротивления. Таким образом, в эквивалентной схеме принимается $R_L = 0$.

Эквивалентная схема модели ПГП и ее основное уравнение.

На рис. 4 представлено строение модели ПГП и ее эквивалентная схема.

Согласно эквивалентной схеме на рис. 4б, поверхностная проводимость между электродами cd равна:

$$G_{\square} = \frac{1}{Ro} \left(1 + \frac{1}{Ro + 2R^*} + \frac{1}{Ro + 4R^*} + \frac{1}{Ro + 6R^*} + \dots \right) =$$

$$= \frac{1}{Ro} \left(1 + \frac{1}{Ro + 2R^*} + \frac{1}{Ro + 4R^*} + \frac{1}{Ro + 6R^*} + \dots \right).$$

Не нарушая общности решения, можно положить $Ro = 1$, тогда

$$G_{\square} = 1 + \frac{1}{1 + 2R^*/Ro} + \frac{1}{1 + 4R^*/Ro} + \frac{1}{1 + 6R^*/Ro} + \dots$$

Обозначая отношение $R^*/Ro = r$, получаем основное уравнение модели ПГП, которое содержит два параметра – число слоев в пластине n и $r = R^*/Ro$, которые могут быть определены путем аппроксимации экспериментальных данных:

$$G_{\square n} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{1 + 2(i-1)r} \quad (1)$$

Сумму в формуле (1) для произвольного числа слоёв можно выразить через специальные функции:

$$G_{\square n}(r) = \frac{\psi\left(n + \frac{1}{2r}\right) - \psi\left(\frac{1}{2r}\right)}{2r}.$$

Здесь $\psi(z)$ – дигамма-функция (логарифмическая производная гамма-функции).

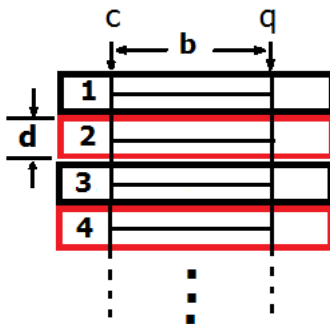


Рис. 4а. Строение модели ПГП: 1-4- ... слои.
Линии – линии тока

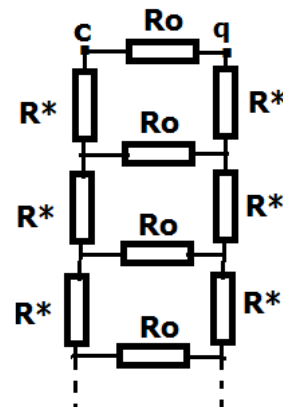


Рис. 4б. Эквивалентная схема модели ПГП

На рис. 5–8 представлены результаты измерения поверхностного сопротивления графеновых пластин, напечатанных чернилами двух типов, и их аппроксимации с помощью уравнения (1).

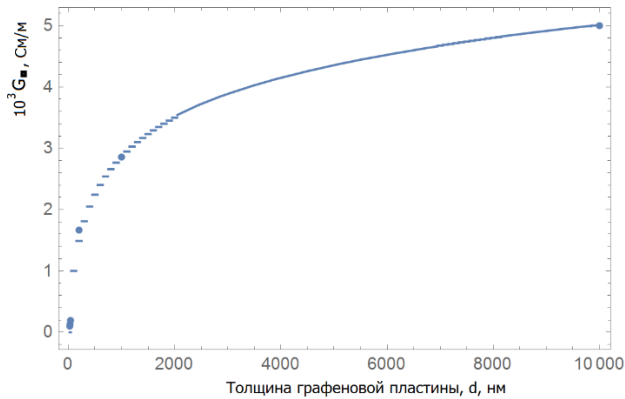


Рис. 5. Поверхностная проводимость графеновой пластины, напечатанной графеновыми чернилами, аппроксимация по (1)

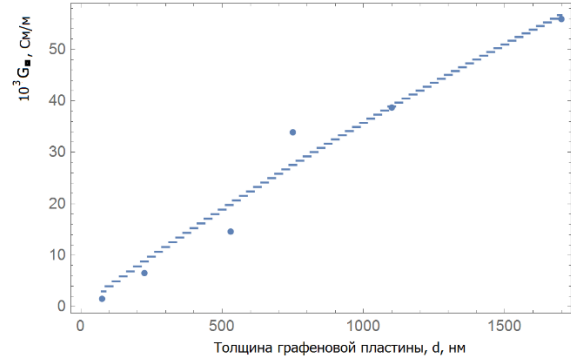


Рис. 6. Поверхностная проводимость графеновой пластины, напечатанной графеновыми чернилами с легирующими полимерными присадками, аппроксимация по (1)

Достоверность аппроксимации для рис. 5 составила 99 %. При этом толщина слоев была равной 100 нм, $r = R^* / R_o = 0.53$.

Для рис. 6 достоверность аппроксимации составила 98 %. При этом толщина слоев была равной 25 нм, $r = R^* / R_o = 3.18 \cdot 10^{-3}$.

Проверка зависимости достоверности аппроксимации от толщины слоев графена представлена на рис. 7 и рис. 8.

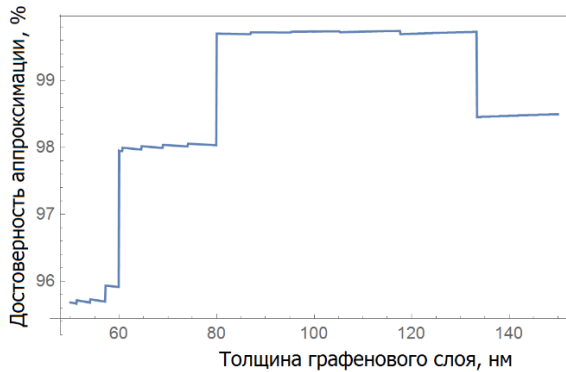


Рис. 7. Зависимость достоверности аппроксимации от толщины слоев графеновой пластины при печати графе новыми чернилами

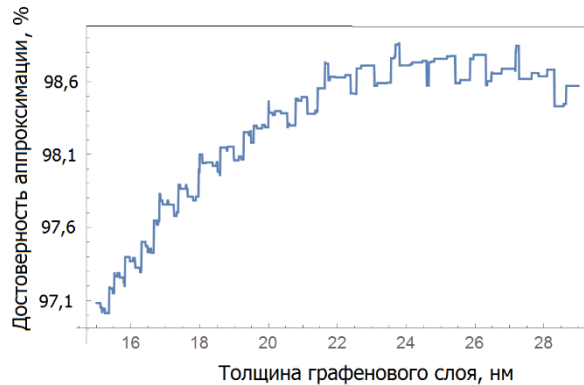


Рис. 8. Зависимость достоверности аппроксимации от толщины слоев графеновой пластины при печати графеновыми чернилами с легирующими полимерными присадками

Как видно из рис. 7 и 8, значения толщин слоев, получаемых в результате аппроксимации, соответствуют максимуму зависимости достоверности аппроксимации от толщины слоев графеновой проводящей пластины.

4. Модели проводимости слоя графеновой пластины

Проводящие чернила на основе графена представляют собой суспензию чешуек, полученных методом эксфолиации, в жидкости, которая может иметь сложный состав. В данной работе использовалась водная суспензия для состава 1, в случае состава 2 применялась

полимерная добавка. Проводящий слой наносился на подложку с помощью струйного принтера в несколько проходов. Струйный принтер создаёт поток микрокапель, которые попадают на подложку – фотобумагу, смачивают поверхность, вода испаряется, графеновые чешуйки и полимерные молекулы остаются на поверхности. Полимерные молекулы могут адсорбироваться также на поверхности графена, причём есть вероятность того, что одна молекула полимера будет взаимодействовать с парой чешуек графена в области их контакта, увеличивая за счёт этого проводимость композита при использовании проводящего полимера. Первый слой чернил взаимодействует с фотобумагой, последующие слои при печати покрывают предыдущие, если плотность потока капель в струе принтера достаточно велика. Поскольку даже один нанесённый слой обладает ненулевой проводимостью (см. рис. 2–3), это означает, что в эксперименте плотность чешуек в одном слое превышает перколяционный предел.

Нам не удалось в литературе найти теоретические модели проводимости систем, состоящих из плоских чешуек, случайным образом уложенных на плоскости в несколько слоёв. Наиболее близкой решённой задачей является проводимость системы случайным образом уложенных на плоскости нанопроволочек [12, 13]. В расчётах учитывалось сопротивление как собственно элементов, так и контактов проводников между собой. Работа [13] является дальнейшим развитием подхода [12], где помимо численного моделирования предложено описание с использованием среднего поля, характеристики которого оценены на основе численного моделирования процесса переноса заряда по системе случайно уложенных на плоскости отрезков проводников малой толщины по сравнению с их длиной, длина предполагается существенно меньшей, чем ширина напечатанного проводящего элемента. Полученные в модели результаты пригодны для расчёта проводимости при поверхностной плотности проволочек, превышающей перколяционный предел. В работе [14] численными методами исследован процесс перколяции в трёхмерной системе твёрдых шаров, которые имеют на поверхности несколько молекул-линкеров, которые могут переносить заряд между сферами при контакте. Применительно к графеновым чернилам можно считать, что линкеры представляют собой проводящие полимерные молекулы, однако сферические частицы являются плохим приближением для моделирования геометрических свойств плоских чешуек графена. В модели считается, что в отсутствие линкера сферические частицы не образуют проводящих кластеров. В нашей работе показано, что в отсутствие полимера один нанесённый слой чернил является проводящим, т.е. прямое использование модели [14] приведёт к неверным результатам в случае малой плотности линкеров на поверхности сфер.

В литературе широко представлены работы по экспериментальному исследованию проводимости полимерных нанокомпозитов, содержащих графен. В работе [15] использовался трёхкомпонентный композит с низким содержанием графена, некоторым количеством проводящего полимера и одним непроводящим связующим. Показано, что при весовом содержании графена 5 % в композите возникает перколяционный кластер и нанесённый рисунок становится проводящим. В работе [16] описаны чернила для трафаретной печати на основе композиции, содержащей графен и полимер, в которую добавлена сажа. Эта добавка приводит к увеличению проводимости и насыщенному черному цвету получаемых рисунков. В статье [17] изучена проводимость отдельных чешуек графена методом атомной силовой микроскопии. Следует особо упомянуть статью К. С. Новосёлова и др. [18], в которой подробно описан текстильный материал с высокой проводимостью, окрашенный проводящими чернилами на основе графена, стабильный при стирке в стиральной машине. Материал получен для использования при конструировании носимой электроники.

Анализ литературы показал, что моделирование проводимости чернил на основе графена возможно с использованием подходов, описанных в [13–15]. Однако прямое использование результатов невозможно из-за существенного отличия геометрии плоских чешуек графена как от линейных нанопроволочек [13, 14], так и от снабженных проводящими линкерами сферических частиц [15]. При моделировании проводимости чернил на основе графена представляется перспективным использовать подход среднего поля [14] в комбинации с моделью линкеров [15].

5. Заключение

Моделирование показало, что нелинейный характер зависимости поверхностной проводимости напечатанной графеновой пластины от ее толщины может быть связан со слоистым строением напечатанной пластины и наличием межслойного сопротивления, которое может определяться строением слоев и механизмами их проводимости. Проводимость композита увеличивается при добавлении проводящего полимера в чернила на основе графена.

Финансирование: Исследование выполнено при поддержке проекта № 071-03-2022-001.

Литература

1. Cherevko A. G., Kriging A. S., Ivanov A. I., Soots R. A., Antonova I. V. Benefits of Printed Graphene with Variable Resistance for Flexible and Ecological 5G Band Antennas // *Materials*. 2022. V. 15, 7267. <https://doi.org/10.3390/ma15207267>.
2. Cherevko A. G., Morgachev, Y. V. Ecological graphene antennas modeling for multi-channel systems for transferring atmospheric data and oceanological information in the range of cellular communications // *Proc. XXV International Symposium Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics*, Novosibirsk, Russia, 1–5 July 2019. V. 1. P. 1208–1212.
3. Sa'don S. N. H., Jamaluddin M. H., Kamarudin M. R., Ahmad F., Yamada Y., Kamardin K., Idris I. H. Analysis of Graphene Antenna Properties for 5G Applications // *Sensors*. 2019. V. 19. 4835.
4. Xu Z, Xiao Z., Jiang S., Song R., He D. A Dual-Band Conformal Antenna Based on Highly Conductive Graphene-Assembled Films for 5G WLAN Applications // *Materials*. 2021, V. 14. 5087.
5. Antonova I. V., Shavelkina M. B., Ivanov A. I., Poteryaev D. A., Nebogatikova N. A., Buzmakova A. A., Soots R. A., Katarzhis V. A. Graphene: Hexagonal Boron Nitride Composite Films with Low-Resistance for Flexible Electronics // *Nanomaterials*. 2022. V. 12. 1703.
6. Патент РФ №2665397, МПК G01S 17/00 Способ получения водной суспензии графена для проводящих чернил / Е. А. Якимчук, И. В. Антонова, Р. А. Соотс. Заявка № 2017145195, заявлено 06.07.2017, опубликовано 29.08.2018.
7. Soots R. A., Yakimchuk E. A., Nebogatikova N. A., Kotin I. A., Antonova I. V. Graphene Suspensions for 2D Printing // *Tech. Phys. Lett.* 2016. V. 42. P. 438–441.
8. Cherevko A., Morgachev Y. Analysis of the Radiation Pattern Stability of Flexible, Eco-Friendly Microstrip and Folded Dipole Antennas in Graphene Design // *Proc. International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. 2021. P. 945–949.
9. Cherevko A., Morgachev Y. Comparative Analysis of Graphene Deposition Technologies for Antennas of Millimeter and Submillimeter Parts of the Spectrum (5-6G) // *Proc. International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. 2021. P. 970–974.
10. Yakimchuk E. A., Soots R. A., Kotin I. A., Antonova I. V. 2D printed graphene conductive layers with high carrier mobility // *Current Appl. Phys.* 2017. № 17. P. 1655–1661.
11. Lee K., Yoon Y., Cho Y., Lee S.M., Shin Y., Lee H., Lee H. Tunable Sub-nanopores of Graphene Flake Interlayers with Conductive Molecular Linkers for Supercapacitors // *ACS Nano*. 2016. № 10. P. 6799–6807.
12. Zezelj M., Stankovic I. From percolating to dense random stick networks: Conductivity model investigation // *Physical Review B*. 2012. V. 86. 134202.
13. Tarasevich Y. Y., Vodolazskaya I. V., Eserkepov A. V. Electrical conductivity of random metallic nanowire networks: an analytical consideration along with computer simulation // *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2022. V. 24. P. 11812–11819.
14. Gouveia M., Dias C. S., Tavares J. M. Percolation in binary mixtures of linkers and particles: Chaining vs branching // *J. Chem. Phys.* 2022. V. 157. 164903.
15. Nezakati T., Tan A., Seifalian A. M. Enhancing the electrical conductivity of a hybrid POSS–PCL/graphene nanocomposite polymer // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2014. V. 435. P. 145–155.

16. Liu L., Shen Z., Zhang X., Ma H. Highly conductive graphene/carbon black screen printing inks for flexible electronics // Journal of Colloid and Interface Science. 2021. V. 582. P. 12–21.
17. Lim S., H. Park H., Yamamoto G., Lee C., Suk J. W. Measurements of the Electrical Conductivity of Monolayer Graphene Flakes Using Conductive Atomic Force Microscopy // Nanomaterials. 2021. V. 11. 2575.
18. Afroj S., Tan S., Abdelkader A. M., Novoselov K. S., Karim N. Highly Conductive, Scalable, and Machine Washable Graphene-Based E-Textiles for Multifunctional Wearable Electronic Applications // Adv. Funct. Mater. 2020. V. 30. 2000293.

Статья поступила в редакцию 01.11.2022.

Черевко Александр Григорьевич

к.ф.-м.н., доцент, заведующий кафедрой физики, заведующий лабораторией физических основ телекоммуникаций СибГУТИ (630102, Новосибирск, ул. Кирова, 86), e-mail: perspl4@mail.ru.

Антонова Ирина Вениаминовна

д.ф.-м.н., профессор, кафедра физики СибГУТИ (630102, Новосибирск, ул. Кирова, 86); Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН (630090, Новосибирск, просп. Лаврентьева, 13), тел. (383) 333-0699, e-mail: antonova@isp.nsc.ru.

Марьясов Александр Георгиевич

к.ф.-м.н., с.н.с., СибГУТИ, e-mail: alexander_maryasov@yahoo.com.

Черевко Александр Александрович

к.ф.-м.н., снс, Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН (630090, Новосибирск, просп. Лаврентьева, 15), e-mail: cherevko@mail.ru.

Conductivity model of graphene printed plates

Alexander G. Cherevko

Philosophy doctor, Associate Professor, Siberian State University of Telecommunications and Information Science (SibSUTIS, Novosibirsk, Russia), e-mail: perspl4@mail.ru.

Irina V. Antonova

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Siberian State University of Telecommunications and Information Science (SibSUTIS, Novosibirsk, Russia), Rzhzanov Institute of Semiconductor Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia), e-mail: antonova@isp.nsc.ru.

Alexander G. Maryasov

Philosophy doctor, Siberian State University of Telecommunications and Information Science (SibSUTIS, Novosibirsk, Russia), e-mail: alexander_maryasov@yahoo.com.

Alexander A. Cherevko

Philosophy doctor Lavrentyev Institute of Hydrodynamics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia), e-mail: cherevko@mail.ru.

A model has been developed to explain the dependence of the surface resistance of printed conductive graphene plates on their surface resistance. The model assumes that the printed conductive graphene plate is layered. The simulation results are compared with the experimental results obtained by the authors. The plates were printed with two types of ink: 1-graphene ink. 2- graphene ink with polymer additives. The reliability of

the approximation of experimental data on the surface conductivity of plates printed by the first and the second types is no worse than 99.5% and 98.5%, respectively. The model made it possible to estimate the effective thickness of graphene printed layers forming a conductive graphene plate. The mechanism of layer conduction is considered.

Keywords: conductivity, graphene, ink, 2D printing, layering.

References

1. Cherevko A.G., Kriging A.S., Ivanov A.I., Soots R.A., Antonova I.V. Benefits of Printed Graphene with Variable Resistance for Flexible and Ecological 5G Band Antennas. *Materials* 2022, 15, 7267.
2. Cherevko A.G., Morgachev, Y.V. Ecological graphene antennas modeling for multi-channel systems for transferring atmospheric data and oceanological information in the range of cellular communications. *Proc. of the XXV International Symposium Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics, Novosibirsk, Russia, 1–5 July 2019*. v. 1. pp. 1208–1212.
3. Sa'don S.N.H., Jamaluddin M.H., Kamarudin M.R., Ahmad F., Yamada Y., Kamardin K., Idris I.H. Analysis of Graphene Antenna Properties for 5G Applications. *Sensors*. 2019. v. 19. 4835.
4. Xu Z, Xiao Z., Jiang S., Song R., He D. A Dual-Band Conformal Antenna Based on Highly Conductive Graphene-Assembled Films for 5G WLAN Applications. *Materials*. 2021, v. 14. 5087.
5. Antonova I.V., Shavelkina M. B., Ivanov A. I., Poteryaev D.A., Nebogatikova N. A., Buzmakova A. A., Soots R. A., Katarzhis V. A. Graphene: Hexagonal Boron Nitride Composite Films with Low-Resistance for Flexible Electronics. *Nanomaterials*. 2022. v. 12. 1703.
6. E.A.Yakimchuk, I.V.Antonova, Soots R.A. *Sposob polucheniya vodnoy suspenzii grafena dlya provodnykh chernil*. Patent RF №2665397, IPC G01S 17/00, 2018.
7. Soots R.A., Yakimchuk E.A., Nebogatikova N.A., Kotin, I.A., Antonova, I.V. Graphene Suspensions for 2D Printing. *Tech. Phys. Lett.* 2016. v. 42. pp. 438–441.
8. Cherevko A., Morgachev Y. Analysis of the Radiation Pattern Stability of Flexible, Eco-Friendly Microstrip and Folded Dipole Antennas in Graphene Design. *Proceedings International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. 2021. pp. 945–949
9. Cherevko A., Morgachev Y. Comparative Analysis of Graphene Deposition Technologies for Antennas of Millimeter and Submillimeter Parts of the Spectrum (5–6G). *Proceedings International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. 2021. pp. 970–974.
10. Yakimchuk E.A., Soots R.A., Kotin I.A., Antonova I.V. 2D printed graphene conductive layers with high carrier mobility. *Current Appl. Phys.* 17 (2017) 1655–1661.
11. Lee K., Yoon Y., Cho Y., Lee S.M., Shin Y., Lee H., Lee H. Tunable Sub-nanopores of Graphene Flake Interlayers with Conductive Molecular Linkers for Supercapacitor. *ACS Nano* 2016, 10, 6799–6807.
12. Zezelj M., Stankovic I. From percolating to dense random stick networks: Conductivity model investigation. *Physical Review B*. 2012. v. 86. 134202.
13. Tarasevich Y.Y., Vodolazskaya I.V., Eserkepov A.V. Electrical conductivity of random metallic nanowire networks: an analytical consideration along with computer simulation. *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2022. v. 24. pp. 11812–11819.
14. Gouveia M., Dias C.S., Tavares J.M. Percolation in binary mixtures of linkers and particles: Chaining vs branching. *J. Chem. Phys.* 2022. v. 157. 164903.
15. Nezakati T., Tan A., Seifalian A.M. Enhancing the electrical conductivity of a hybrid POSS–PCL/graphene nanocomposite polymer. *J. Colloid and Interface Science*. 2014. v. 435. pp. 145–155.
16. Liu L., Shen Z., Zhang X., Ma H. Highly conductive graphene/carbon black screen printing inks for flexible electronics. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2021. v. 582. pp.12–21.
17. Lim S., H. Park H., Yamamoto G., Lee C., Suk J.W. Measurements of the Electrical Conductivity of Monolayer Graphene Flakes Using Conductive Atomic Force Microscopy. *Nanomaterials*. 2021. v. 11. 2575.
18. Afroj S., Tan S., Abdelkader A.M., Novoselov K.S., Karim N. Highly Conductive, Scalable, and Machine Washable Graphene-Based E-Textiles for Multifunctional Wearable Electronic Applications. *Adv. Funct. Mater.* 2020. v. 30. 2000293.