

2023



4(21)

ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Infokommunikacionnye
Tehnologii



ISSN 2073-3909

«Инфокоммуникационные технологии»

Периодический научно-технический и информационно-аналитический журнал
Том 21, № 4 (84), 2023

Учредитель и издатель журнала:

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики» (г. Самара)

Главный редактор, председатель редакционного совета

Горячкин О.В., д.т.н., профессор (ПГУТИ, г. Самара).

Заместители главного редактора

Васин Н.Н., д.т.н., профессор; Тарасов В.Н., д.т.н., профессор.

Редакционный совет

Мишин Д.В., д.т.н., профессор (ПГУТИ, г. Самара); Сойфер В.А., академик РАН (Самарский университет, г. Самара); Бузов А.Л., д.т.н., профессор (АО «СИП РС», г. Самара); Васильев К.К., д.т.н., профессор (УлГТУ, г. Ульяновск); Воронин А.А., д.ф.-м.н., профессор (ВолГУ, г. Волгоград); Кубанов В.П., д.т.н., профессор (ПГУТИ, г. Самара); Лихтциндер Б.Я., д.т.н., профессор (ПГУТИ, г. Самара); Надеев А.Ф., д.ф.-м.н., профессор (КНИТУ-КАИ, г. Казань); Султанов А.Х., д.т.н., профессор (УУНиТ, г. Уфа); Цым А.Ю., д.т.н., с.н.с. (ЦНИИС, г. Москва); Щербаков М.А., д.т.н., профессор (ПГУ, г. Пенза); Морозов О.Г., д.т.н., профессор (КНИТУ-КАИ, г. Казань).

Редакционная коллегия

Бахарева Н.Ф., д.т.н., профессор (ПГУТИ, г. Самара); Карташевский В.Г., д.т.н., профессор (ПГУТИ, г. Самара); Осипов О.В., д.ф.-м.н., доцент (ПГУТИ, г. Самара); Росляков А.В., д.т.н., профессор (ПГУТИ, г. Самара); Тяжев А.И., д.т.н., профессор (ПГУТИ, г. Самара); Карташевский И.В., д.т.н., доцент (СПбГУТ, г. Санкт-Петербург); Бурдин А.В., д.т.н., доцент (АО «НПО ГОИ им. С. И. Вавилова», г. Санкт-Петербург); Картак В.М., д.ф.-м.н., профессор (УУНиТ, г. Уфа); Ляшев В.А., к.т.н. (МФТИ, г. Москва); Сингх Г., PhD в области электроники и связи, профессор (Малавийский национальный технологический институт Джайпура, г. Джайпур); Ким Ч., PhD в области компьютерных наук, доцент (Корейский университет, г. Сеул); Тивари М., PhD в области электроники и связи по направлению «Оптоэлектроника», профессор (Манипальский университет Джайпура, г. Джайпур); Джаньяни В., PhD в области электроники и связи, профессор (Малавийский национальный технологический институт Джайпура, г. Джайпур); Али Дж., PhD в области физики плазмы, профессор (Азиатский столичный университет, г. Джохор-Бару).

Выпускающие редакторы: Диязитдинова А.А., Шевченко А.И.

Редактор номера: Тарасов В.Н.

Компьютерный набор и верстка: Вукмирович Д.Д.

Корректора: ООО «Навигатор»

Адрес редакции и издателя журнала:

443010, Российская Федерация, г. Самара, ул. Льва Толстого, 23,
Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики.

Телефон +7 846 339-11-09. E-mail: redikt@psuti.ru

Издается с 2003 г. Выходит 4 раза в год.

ПИ № ФС77-82293 от 08.12.2021 г. выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

Решением ВАК Минобрнауки России журнал «Инфокоммуникационные технологии» включен в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

© Инфокоммуникационные технологии, 2024.

Подписной индекс 41914 в каталоге ООО «Урал-Пресс Округ».

Тиражирование содержания журнала
в электронном и любом другом виде –
с письменного разрешения редакции.
443010, Российская Федерация, г. Самара,
ул. Льва Толстого, 23

Дата выхода в свет 24.07.2024
Цена свободная. 0+. Тираж 100 экз.
Отпечатано в типографии ООО «Слово».
443070, Российская Федерация, г. Самара,
ул. Песчаная, 1. Тел. +7 846 267-36-82
E-mail: izdatkniga@yandex.ru

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИЙ ПЕРЕДАЧИ И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ И СИГНАЛОВ

Тарасов В.Н., Бахарева Н.Ф.	Численно-аналитическая модель задержки на основе СМО с операционным сдвигом законов распределений	7
--------------------------------	---	---

СЕТИ СВЯЗИ И МУЛЬТИСЕРВИСНЫЕ УСЛУГИ

Трошин А.В.	Выявление аномалий трафика в бортовой сети автомобиля с помощью рекуррентной LSTM нейросети	12
Лихтциндер Б.Я., Привалов А.Ю.	Сравнение гиперэкспоненциальных и групповых пуассоновских моделей трафика мультисервисных сетей связи	18

СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

Лихтциндер Б.Я., Привалов А.Ю., Максимова Т.Д.	Групповые гамма-потoki и нейросети в моделировании современного телекоммуникационного трафика	23
--	---	----

ЛИНИИ СВЯЗИ И ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

Бакирова Л.И., Воронков Г.С. Любопытов В.С., Степанов И.В., Кутлуяров Р.В., Грахова Е.П., Багманов В.Х.	Оптимизация распространения мод для излучателя оптических вихревых пучков на основе микрокольцевого резонатора	29
Виноградова И.Л., Головина Е.Ю.	Выработка рекомендаций по структуре ВОЛП городских сетей, минимально искажающей информационно-управляющие ФИМД-сигналы	37

РАДИОПЕРЕДАЮЩИЕ И РАДИОПРИЕМНЫЕ УСТРОЙСТВА, ТЕЛЕВИДЕНИЕ

Диязитдинов Р.Р., Сизиков И.С.	Алгоритм приема в целом с поэлементным принятием решения при использовании метода фазовой модуляции	47
Тяжев А.И.	Особенности построения модемов сигналов минимальной частотной манипуляции	54

НОВЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Пальмов С.В, Диязитдинова А.А.	Разработка обучающей интеллектуальной аналитической системы с использованием технологии ХАИ	59
Диязитдинова А.Р. Сальникова Д.А.	WEB-приложение «Электронный читательский дневник» с элементами AGILE-технологии	65
Аббаси М.М., Бельтюков А.П.	Извлечение смысла из текста с использованием глобальной матрицы для лучшего взаимодействия между человеком и машиной	74
Борисов В.В., Сивков В.С.	Концепция применения алгоритмов управления манипуляционными роботами для выполнения сложных технологических операций в промышленности	82
Белов К.С., Харитонов А.С., Чернова С.В.	На перекрестке технологий и медицины: перспективы автоматизации в медицинской практике с применением нейросетей	89

ТЕХНОЛОГИИ РАДИОСВЯЗИ, РАДИОВЕЩАНИЯ И ТЕЛЕВИДЕНИЯ

Сутягина Л.Н.	Анализ основных показателей качества предоставления услуг операторами подвижной радиотелефонной связи Приволжского федерального округа	93
---------------	--	----

УПРАВЛЕНИЕ И ПОДГОТОВКА КАДРОВ ДЛЯ ОТРАСЛИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

Симагина С.Г., Матвеева Е.А., Черных О.Н., Афанасьев А.В.	Моделирование бизнес-процесса формирования оплаты труда рабочих производственного предприятия в условиях цифровой трансформации	103
--	---	-----

CONTENTS

THEORETICAL FOUNDATIONS OF TRANSMISSION TECHNOLOGIES AND INFORMATION AND SIGNAL PROCESSING

Tarasov V.N., Bakhareva N.F.	Numerical-analytical Delay Model Based on QS with Operational Shift of Distribution Principles	7
---	---	----------

COMMUNICATION NETWORKS AND MULTI-SERVICES

Troshin A.V.	Traffic Anomaly Detection in Vehicle Bus by Recurrent LSTM Neural Network	12
Lichtzinder B.Ya. Privalov A.Yu.	Comparison of Hyperexponential and Group Poisson Traffic Models of Multiservice Communication Networks	18

TELECOMMUNICATION SYSTEMS AND DEVICES

Likhttsinder B.Ya., Privalov A.Yu., Maksimova T.D.	Group Gamma-Distribution and Neural Network in of The Latest Telecommunication Traffic Modeling	23
---	--	-----------

COMMUNICATION LINES AND FIBER-OPTIC TELECOMMUNICATIONS TECHNOLOGIES

Bakirova L.I., Voronkov G.S., Lyubopytov V.S, Stepanov I.V., Kutluyarov R.V., Grakhova E.P., Bagmanov V. Kh.	Optimization of Mode Propagation for an Embedier of Optical Vortex Beams Based on a Micro-Ring Resonator	29
Vinogradova I.L., Golovina E.Yu.	Recommendations on the Urban Network Fotl Structure with the Lowest Possible Level of Distortion of Information and Control ILCF-signals	37

RADIO TRANSMITTING AND RECEIVING DEVICES, TELEVISION

Diyazitdinov R.R., Sizikov I.S.	Reception Algorithm as a Whole with Element- by-Element Decision Making Using the Phase Modulation Method	47
Tyazhev A.I.	Structure Features of Minimum Frequency Shift Keying Signal Modems	54

NEW INFORMATION TECHNOLOGIES

Palmov S.V., Diyazitdinova A.A.	Development of an Educational Intelligent Analytical System Using XAI Technology	59
Diyazitdinova A.R., Salnikova D.A.	WEB Application «Electronic Reader's Diary» by Agile Technology	65
Abbasi M.M., Beltikov A.P.	Intent Extraction from Text by Using Global Feature Matrix to Improve Man Machine Interaction	74
Borisov V.V., Sivkov V.S.	Concept of Application of Control Algorithms for Manipulation Robots to Perform Complex Technological Operations in Industry	82
Belov K.S., Kharitonov A.S., Chernova S.V.	At the Crossroads of Technology and Medicine: Prospects of Automation in Medical Practice with the Use of Neural Networks	89

TECHNOLOGIES OF RADIO COMMUNICATION, RADIO BROADCASTING AND TELEVISION

Sutyagina L.N.	Analysis of the General Quality Indicators of the Provision Mobile Radiotelephone Communication Operators of the Volga Federal District	93
-----------------------	--	-----------

MANAGEMENT AND TRAINING FOR THE TELECOMMUNICATIONS INDUSTRY

Simagina S.G., Matveeva E.A., Chernykh O.N., Afanasyev A.V.	An Ontological Model of Workers' Remuneration within the Context of an Enterprise Digital Transformation	103
--	---	------------

«Infokommunikacionnye tehnologii»

Periodic technical and scientific information and analytical magazin
2023, vol. 21, no. 4 (84)

Founder and Publisher of the Journal:

Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics (Samara)

Chief Editor, Chairman of the Editorial Management

Goryachkin O.V., Tenured Professor, Doctor (PSUTI, Samara).

Deputy Chief Editor

Vasin N.N., Tenured Professor, Doctor; Tarasov V.N., Tenured Professor, Doctor.

Editorial Management

Mishin D.V., Tenured Professor, Doctor (PSUTI, Samara);

Soifer V.A., Academic Professor RAS (Samara National Research University, Samara);

Buzov A.L., Tenured Professor, Doctor (SIPRS, Ltd., Samara);

Vasiliev K.K., Tenured Professor, Doctor (UISTU, Ulyanovsk);

Voronin A.A., Tenured Professor, Doctor (VolSU, Volgograd);

Kubanov V.P., Tenured Professor, Doctor (PSUTI, Samara);

Likhtsinder B.Y., Tenured Professor, Doctor (PSUTI, Samara);

Nadeev A.F., Tenured Professor, Doctor (KNRTU-KAI, Kazan);

Sultanov A.H., Tenured Professor, Doctor (UUST, Ufa);

Tsym A.Y., Tenured Professor, Senior Manager Associate (CSRJC, Moscow);

Shcherbakov M.A., Tenured Professor, Doctor (PSU, Penza);

Morozov O.G., Tenured Professor, Doctor (KNRTU-KAI, Kazan).

Editorial Board

Bahareva N.F., Tenured Professor, Doctor (PSUTI, Samara); Kartashevskii V.G., Tenured Professor, Doctor (PSUTI, Samara); Osipov O.V., Associate Professor, Doctor (PSUTI, Samara); Roslyakov A.V., Tenured Professor, Doctor (PSUTI, Samara); Tyagev A.I., Tenured Professor, Doctor (PSUTI, Samara); Kartashevsky I.V., Associate Professor, Doctor (SPbSUT, Saint Petersburg); Burdin A.V., Associate Professor, Doctor (JSC S.I. Vavilov State Optical Institute, Saint Petersburg); Kartak V.M., Professor, Doctor (UUST, Ufa); Lyashev V.A., PhD in Technical Science (MIPT, Moscow); Singh G., Professor, PhD in Electronics and Communication Engineering (Malaviya National Institute of Technology Jaipur, Jaipur); Kim J., Associate Professor, PhD in Computer Science (Korea University, Seoul); Tiwari M., Professor, PhD in Electronics and Communication Engineering with specialization in Optoelectronics (Manipal University Jaipur, Jaipur); Janyani V., Professor, PhD in Electronics and Communication Engineering (Malaviya National Institute of Technology Jaipur, Jaipur); Ali J., Professor, PhD in Plasma Physics (Asia Metropolitan University, Johor Bahru).

Executive Editors: Diyazitdinova A.A., Shevchenko A.I.

Editor of Issue: Tarasov V.N.

Type Setting and Page Make Up: Vukmirovich D.D.

Proofreading: «Navigator» LLC

Editor and Publishing House Address:

23, L. Tolstoy Street, Samara, 443010, Russian Federation,

Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics.

Phone +7 846 339-11-09. E-mail: redikt@psuti.ru

Published since 2003. Edited 4 times a year. Licensed PI № FS 77-82293 on 08.12.2021 issued by The Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology, and Mass Media (Roskomnadzor)

Under the verdict of Higher Attestation Commission of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, the journal «Info-communication Technologies» is included in the list of peer-reviewed scientific editions, in which the main scientific results of dissertations for the degree of candidate of sciences, for the degree of doctor of sciences should be published.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИЙ ПЕРЕДАЧИ И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ И СИГНАЛОВ

УДК 004.942

ЧИСЛЕННО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗАДЕРЖКИ НА ОСНОВЕ СМО С ОПЕРАЦИОННЫМ СДВИГОМ ЗАКОНОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ

Тарасов В.Н., Бахарева Н.Ф.

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ

E-mail: v.tarasov@psuti.ru, n.bakhareva@psuti.ru

В данной статье демонстрируются результаты для системы массового обслуживания, сформированной подвергнутыми операции сдвига вправо распределением Эрланга и гиперэкспоненциальным распределением второго порядка. Как известно, первое распределение обеспечивает коэффициент вариации меньше единицы, а второе – больше единицы. Сдвиг закона распределения увеличивает математическое ожидание случайной величины, не изменяя при этом ее среднеквадратическое отклонение. Следовательно, при этом уменьшается коэффициент вариации случайной величины. В тоже время, из общей теории систем G/G/1 известна функциональная зависимость задержки требований в очереди от квадратов коэффициентов вариаций интервалов поступлений и времени обслуживания, а представленная система относится именно к этому типу. Таким образом, операционный сдвиг законов распределений приводит к многократному уменьшению задержки по сравнению с обычной системой, и эта величина зависит от значения параметра сдвига. Для построения математической модели задержки использован метод спектрального решения уравнения Линдли, который как известно, применяется во многих сферах научных исследований. В статье также использованы известные приемы аппроксимации законов распределений. Полученные результаты численно-аналитического моделирования в Mathcad однозначно подтверждают адекватность предложенной математической модели задержки.

Ключевые слова: операционный сдвиг закона распределения, уравнение Линдли, спектральное решение

Введение

В русскоязычной и англоязычной научной литературе авторами не обнаружено сведений о системах массового обслуживания (СМО), сформированных с помощью операционного сдвига законов распределений интервалов поступлений и времени обслуживания. Такие СМО с операционным сдвигом законов распределений в дальнейшем будем рассматривать как системы с запаздыванием по времени. Наиболее близко к этой тематике относятся работы [1; 2], в которых аппроксимация очередей к интернет ресурсам представлена как система с запаздыванием во времени.

Исследования по рассматриваемой тематике приведены во многих работах авторов, включая [3–6]. Используемый для этого метод наиболее полно с демонстрацией примеров описан в [7]. Данный метод используется во многих областях научных исследований, например [8; 9]. Кроме того, в работе использованы приемы и методы аппроксимации законов распределений [10–13]. Сравнительно новые результаты по СМО представлены в [14–17].

В работе [6] приведены полученные автором результаты по системе, сформированной функциями плотностей вида:

$$a(t) = 4\lambda^2 t e^{-2\lambda t},$$

$$b(t) = q\mu_1 e^{-\mu_1 t} + (1-q)\mu_2 e^{-\mu_2 t}.$$

Для нее получена следующая математическая модель задержки:

$$\bar{W} = \frac{1}{\sigma_1} + \frac{1}{\sigma_2} - \frac{1}{\mu_1} - \frac{1}{\mu_2}. \quad (1)$$

Здесь σ_1, σ_2 – инверсные значения корней $-\sigma_1, -\sigma_2$ многочлена третьей степени $\sigma^3 - c_2\sigma^2 - c_1\sigma - c_0$ с коэффициентами $c_2 = 4\lambda - \mu_1 - \mu_2$, $c_1 = 4\lambda \cdot (\mu_1 + \mu_2 - \lambda) - \mu_1\mu_2$, $c_0 = 4\lambda^2 q \cdot (\mu_1 - \mu_2) + 4\lambda\mu_1(\mu_2 - \lambda)$, включающими параметры распределений $a(t)$ – интервалов поступлений и $b(t)$ – времени обслуживания.

Все параметры выражения (1) определяются методом моментов через числовые характеристики распределений $a(t)$ и $b(t)$:

$$\bar{\tau}_\lambda = \frac{1}{\lambda}, \quad \bar{\tau}_\lambda^2 = \frac{3}{2\lambda^2}, \quad \bar{\tau}_\mu = \frac{q}{\mu_1} + \frac{(1-q)}{\mu_2},$$

$$\bar{\tau}_\mu^2 = \frac{2q}{\mu_1^2} + \frac{2(1-q)}{\mu_2^2}, \quad [6].$$

Здесь « $\rightarrow$ » стандартная операция усреднения для моментов.

Постановка и решение задачи

Теперь подвергнем распределения $a(t)$ и $b(t)$ операции сдвига вправо:

$$a(t) = \begin{cases} 4\lambda^2 (t - t_0) e^{-2\lambda(t-t_0)}, & t > t_0, \\ 0, & 0 \leq t \leq t_0, \end{cases}, \quad (2)$$

$$b(t) = \begin{cases} q\mu_1 e^{-\mu_1(t-t_0)} + (1-q)\mu_2 e^{-\mu_2(t-t_0)}, & t > t_0, \\ 0, & 0 \leq t \leq t_0. \end{cases} \quad (3)$$

В качестве новых законов распределений $a(t)$ и $b(t)$, формирующих СМО, будем рассматривать (2) и (3). Авторами ставится задача получения численно-аналитической модели задержки для системы, формируемой законами распределений (2) и (3).

Для решения поставленной задачи запишем изображение Лапласа для функций (2) и (3):

$$A^*(s) = [2\lambda / (2\lambda + s)]^2 \cdot e^{-t_0 s},$$

$$B^*(s) = [q \frac{\mu_1}{s + \mu_1} + (1-q) \frac{\mu_2}{s + \mu_2}] \cdot e^{-t_0 s}.$$

Разложение выражения $A^*(-s) \cdot B^*(s) - 1 = \alpha(s)/\beta(s)$ на дробно-рациональные функции $\alpha(s)$ и $\beta(s)$ приведет к равенству вида:

$$\frac{\alpha(s)}{\beta(s)} = \left(\frac{2\lambda}{2\lambda - s} \right)^2 e^{t_0 s} \times [q \frac{\mu_1}{s + \mu_1} + (1-q) \frac{\mu_2}{s + \mu_2}] e^{-t_0 s}$$

$$-1 = \frac{-s(s + \sigma_1)(s + \sigma_2)(s - \sigma_3)}{(2\lambda - s)^2 (s + \mu_1)(s + \mu_2)}, \quad (4)$$

т.к. полином четвертой степени в числителе выражения (4) можно представить в виде разложения $-\sigma(\sigma^3 - c_2\sigma^2 - c_1\sigma - c_0)$ с коэффициентами, которые приведены выше. Наша задача состоит в определении нулей и полюсов выражения (4). Здесь опущены не очень сложные математические выкладки.

Нужные нам нули полинома третьей степени $\sigma^3 - c_2\sigma^2 - c_1\sigma - c_0$ (два действительных отрицательных числа) обозначим $-c_1$, $-c_2$, а одно положительное число σ_3 . Тогда дробно-рациональные функции $\alpha(s)$ и $\beta(s)$ из выражения (4) будут иметь вид:

$$\alpha(s) = \frac{s(s + \sigma_1)(s + \sigma_2)}{(s + \mu_1)(s + \mu_2)},$$

$$\beta(s) = -\frac{(2\lambda - s)^2}{(s - \sigma_3)}$$

Из выражения (4) для всех систем с операционным сдвигом следует одно общее свойство, выражающееся в том, что операционный сдвиг не влияет на спектральное решение, т.е. последнее остается инвариантным к операции сдвига законов распределений у СМО. Это вытекает из свойства запаздывания изображения Лапласа и из специфики выражения $A^*(-s) \cdot B^*(s) - 1 = \alpha(s)/\beta(s)$, где присутствуют противоположные знаки у перед комплексной частотой s . Теперь, после того, как найдены составляющие спектрального решения $\alpha(s)$ и $\beta(s)$, а также определены их нули и полюса, мы можем утверждать, что они удовлетворяют всем требованиям спектрального решения [7].

Таким образом, для систем с операционным сдвигом законов распределений, можем использо-

вать те же результаты, что и для обычных систем. При этом учитываем последствия применения операции сдвига, которые изменят и числовые характеристики, а также параметры этих распределений.

Спектральные решения для обычной системы и системы с операционным сдвигом будут совпадать, и, следовательно, численно-аналитическая модель задержки (1) справедлива и для системы с операционным сдвигом. При этом надо учесть тот факт, что числовые характеристики сдвинутых распределений (2) и (3) и параметры этих распределений становятся функционально зависимыми от параметра сдвига.

Для применения в дальнейшем формулы (1) для расчета средней задержки, через изображения Лапласа запишем начальные моменты до второго порядка.

Для закона распределения (2):

$$\bar{\tau}_\lambda = \lambda^{-1} + t_0, \quad \bar{\tau}_\lambda^2 = t_0^2 + \frac{2t_0}{\lambda} + \frac{3}{2\lambda^2},$$

$$c_\lambda = [\sqrt{2}(1 + \lambda t_0)]^{-1}. \quad (5)$$

Для закона распределения (3)

$$\bar{\tau}_\mu = q\mu_1^{-1} + (1-q)\mu_2^{-1} + t_0$$

$$\bar{\tau}_\mu^2 = 2[q\mu_1^{-2} + (1-q)\mu_2^{-2}] + t_0^2 + 2t_0[q\mu_1^{-1} + (1-q)\mu_2^{-1}], \quad (6)$$

$$c_\mu^2 = \frac{[(1-q^2)\mu_1^2 - 2\mu_1\mu_2q(1-q) + q(2-q)\mu_2^2]}{[t_0\mu_1\mu_2 + (1-q)\mu_1 + q\mu_2]^2}.$$

Из уравнений моментов (5) и (6) определяем параметры распределений (2) и (3). Из них следует, что параметры μ , c_μ , t_0 связаны ограничением $c_\mu \geq 1 - t_0 / \bar{\tau}_\mu$, $0 < t_0 < \bar{\tau}_\mu$. Таким образом, система $E_2/H_2/1$, сформированная операционным сдвигом распределений (2) и (3) применима при выполнении ограничений

$$c_\mu \geq 1 - t_0 / \bar{\tau}_\mu, \quad 0 < t_0 < \bar{\tau}_\mu. \quad (7)$$

Функциональная зависимость коэффициентов вариаций интервалов поступлений и времени обслуживания c_λ и c_μ от параметра сдвига t_0 явно прослеживается из выражений (5) и (6), и как будет видно из следующего раздела, полностью подтверждается при численном расчете.

Алгоритм применения выражения (1) для дальнейших расчетов относительно прост. Через заданные начальные моменты распределений из уравнений (5) и (6) последовательно определяем все параметры выражения (1) [6].

Численные эксперименты в Mathcad

На рисунке 1 представлен вариант расчета среднего времени ожидания для случая высокой нагрузки, равной 0,95 при коэффициенте вариации времени обслуживания, равном 2 и параметре сдвига 0,99.

Таблица 1. Результаты серии численных расчетов в Mathcad

Входные параметры				Среднее время ожидания	
ρ	c_λ	c_μ	t_0	для системы S_2	для системы S_1
0,6	0,287	1,010	0,99	0,764	3,212
	0,495	1,500	0,5	1,702	
	0,672	1,818	0,1	2,865	
	0,703	1,990	0,01	3,176	
	0,707	1,998	0,001	3,208	
0,95	0,042	1,010	0,99	9,690	42,570
	0,371	1,500	0,5	22,471	
	0,640	1,900	0,1	37,980	
	0,700	1,990	0,01	42,098	
	0,706	1,999	0,001	42,522	

$$\begin{aligned}
 \tau\mu &:= 1 & \tau\lambda &:= \frac{20}{19} & \rho &:= \frac{\tau\mu}{\tau\lambda} = 0.95 & t_0 &:= 0.99 \\
 \lambda &:= \frac{1}{(\tau\lambda - t_0)} = 15.96638655 & c\lambda &:= \frac{1}{\sqrt{2} \cdot (1 + \lambda \cdot t_0)} = 0.04207285 \\
 q &:= \frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{(\tau\mu - t_0)^2}{2 \cdot [(\tau\mu - t_0)^2 + c\mu^2 \cdot \tau\mu^2]}} = 0.99995099 & c\mu &:= 2 - \frac{t_0}{\tau\mu} = 1.01 \\
 \mu_1 &:= 2 \cdot \frac{q}{(\tau\mu - t_0)} = 199.99019752 & \mu_2 &:= 2 \cdot \frac{(1 - q)}{(\tau\mu - t_0)} = 0.00980248 \\
 C_2 &:= 4 \cdot \lambda - \mu_1 - \mu_2 = -136.13445378 & C_1 &:= 4\lambda \cdot (\mu_1 + \mu_2 - \lambda) - \mu_1 \cdot \mu_2 = 11751.44684533 \\
 C_0 &:= 4 \cdot \lambda^2 \cdot q \cdot (\mu_1 - \mu_2) + 4 \cdot \lambda \cdot \mu_1 (\mu_2 - \lambda) = 105.21177462 \\
 \text{Given} & & \sigma^3 - C_2 \cdot \sigma^2 - C_1 \cdot \sigma - C_0 &= 0 \\
 \text{Find}(\sigma) &\rightarrow (-8.952\text{E}-003 \quad -1.961\text{E}+002 \quad 5.994\text{E}+001) \\
 \sigma_1 &:= 0.0089521628052948987533 & \sigma_2 &:= 196.06745193676547407 \\
 W &:= \frac{1}{\sigma_1} + \frac{1}{\sigma_2} - \frac{1}{\mu_1} - \frac{1}{\mu_2} = 9.69
 \end{aligned}$$

Рисунок 1. Пример численного расчета в программе Mathcad

Из программы на Mathcad хорошо прослеживается алгоритм применения расчетной формулы (1). В таблице 1 представлены результаты серии численных расчетов в Mathcad.

В таблице 1 приведены результаты численных расчетов в Mathcad для указанной системы с операционным сдвигом законов распределений (обозначена S_2) при значениях параметра сдвига t_0 от 0,001 до 0,99 для случаев умеренной и высокой нагрузки

($\rho = 0,6; 0,95$) для сравнительно малого значения коэффициента вариации времени обслуживания значения $c_\mu = 2$ соответственно для обычной системы (обозначена S_1).

Заключение

Операционный сдвиг законов распределений уменьшает коэффициенты вариаций интервала между поступлениями и времени обслуживания требований и, как следствие, уменьшается средняя

задержка. Результаты табл. 1 демонстрируют, как уменьшаются коэффициенты вариаций при изменении значений параметра сдвига.

Адекватность предложенной численно-аналитической модели задержки в системе с операционным сдвигом подтверждается несколькими факторами. Во первых результаты расчетов таблицы 1 полностью подтверждают общую теорию систем G/G/1 в части функциональной зависимости задержки от коэффициентов вариаций. Во-вторых, поведение задержки в зависимости от величины параметра сдвига свидетельствует о сохранении свойства непрерывности для указанных СМО, обычных и с операционным сдвигом. Кроме того, результаты по системам с запаздыванием по времени согласуются с данными имитационного моделирования [18].

Литература

1. Limiting the oscillations in queues with delayed information through a novel type of delay announcement / S. Novitzky [et al.] // Queueing Systems. 2020. Vol. 95. P. 281–330. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11134-020-09657-9>
2. Nonlinear dynamics in queueing theory: determining the size of oscillations in queues with delay / S. Novitzky [et al.] // SIAM Journal on Applied Dynamical Systems. 2019. Vol. 18, no. 1. P. 279–311.
3. Тарасов В.Н. Расширение класса систем массового обслуживания с запаздыванием // Автоматика и телемеханика. 2018. № 12. С. 57–70.
4. Тарасов В.Н., Ахметшина Э.Г. Среднее время ожидания в системе массового обслуживания H2/H2/1 с запаздыванием // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физико-математические науки. 2018. Т. 22, № 4. С. 702–713.
5. Тарасов В.Н. Системы массового обслуживания с запаздыванием во времени // Информационные технологии. 2021. Т. 27, № 6. С. 291–298.
6. Тарасов В.Н. Спектральное разложение для модели задержки на основе СМО с эрланговским и гиперэкспоненциальным распределениями // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2022. Т. 25, № 3. С. 24–28.
7. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания / под редакцией В.И. Неймана; пер. с англ. М.: Машиностроение, 1979. 432 с.
8. Do T.V., Chakka R., Sztrik J. Spectral expansion solution methodology for QBD-M processes and applications in future internet engineering // Studies in Computational Intelligence. 2016. Vol. 479. P. 131–142. DOI: [10.1007/978-3-319-00293-4-11](https://doi.org/10.1007/978-3-319-00293-4-11)
9. Spectral method for two-dimensional ocean acoustic propagation / X.A. Ma [et al.] // Journal of Marine Science and Engineering. 2021. No. 9. P. 1–19. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse9080892>
10. Алиев Т.И. Основы моделирования дискретных систем. СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. 363 с.
11. Алиев Т.И. Аппроксимация вероятностных распределений в моделях массового обслуживания // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 2(84). С. 88–93.
12. Myskja A. An improved heuristic approximation for the GI/GI/1 queue with bursty arrivals // Teletraffic and Datatraffic in a Period of Change: ITC-13. Elsevier Science Publishers, 1991. P. 683–688.
13. Whitt W. Approximating a point process by a renewal process: two basic methods // Operation Research. 1982. Vol. 30, no. 1. P. 125–147.
14. Gromoll H.C., Terwilliger B., Zwart B. Heavy traffic limit for a tandem queue with identical service times // Queueing Systems. 2018. Vol. 89, no. 3. P. 213–241.
15. Jacobovic R., Kella O. Asymptotic independence of regenerative processes with a special dependence structure // Queueing Systems. 2019. Vol. 93. P. 139–152. DOI: [10.1007/s11134-019-09606-1](https://doi.org/10.1007/s11134-019-09606-1)
16. Wang L., Kulkarni V. Fluid and diffusion models for a system of taxis and customers with delayed matching // Queueing Systems. 2020. Vol. 96. P. 101–131. DOI: [10.1007/s11134-020-09659-7](https://doi.org/10.1007/s11134-020-09659-7)
17. Legros B. M/G/1 queue with event-dependent arrival rates // Queueing Systems. 2018. Vol. 89, no. 3. P. 269–301.
18. Тарасов В.Н., Бахарева Н.Ф. Имитационная модель СМО с гиперэкспоненциальным распределением в среде GPSS WORLD // Информационные технологии. 2022. Т. 20, № 4. С. 7–13. DOI: [10.18469/ikt.2022.20.3.03](https://doi.org/10.18469/ikt.2022.20.3.03)

Получено 20.03.2024

Тарасов Вениамин Николаевич, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой управления в технических системах Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ). 443090, Российская Федерация, г. Самара, Московское шоссе, 77. Тел. +7 846 228-00-13. E-mail: v.tarasov@psuti.ru

Бахарева Надежда Федоровна, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой информатики и вычислительной техники ПГУТИ. 443090, Российская Федерация, г. Самара, Московское шоссе, 77. Тел. +7 846 339-11-31. E-mail: n.bahareva@psuti.ru

NUMERICAL-ANALYTICAL DELAY MODEL BASED ON QS WITH OPERATIONAL SHIFT OF DISTRIBUTION PRINCIPLES

Tarasov V.N., Bakhareva N.F.

*Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russian Federation
E-mail: v.tarasov@psuti.ru, n.bahareva@psuti.ru*

This article demonstrates results for a queuing system formed by right-shifting an Erlang distribution and a second-order hyperexponential distribution. As is known, the first distribution provides a coefficient of variation less than one, and the second one – more than one. From the general queuing theory, it is known that the average delay of requests in the queue in the QS G/G/1 is related to the coefficients of variation of arrival intervals and service times by a quadratic dependence, and the system we are considering belongs precisely to this type. An operational shift in the distribution laws leads to a multiple reduction in delay compared to a conventional system, and this value depends on the value of the shift parameter. To construct a mathematical model of the delay, the method of spectral solution of the Lindley integral equation for the system under consideration was applied. For the practical application of the obtained results, the standard method of probability theory moments is used. The obtained results of numerical and analytical modeling in Mathcad clearly confirm the adequacy of the proposed mathematical delay model.

Keywords: *shifted Erlang and hyperexponential distributions, Lindley integral equation, spectral decomposition method, Laplace transform*

DOI: 10.18469/ikt.2023.21.4.01

Tarasov Veniamin Nikolaevich, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 77, Moskovskoe shosse, Samara, 443090, Russian Federation. Head of Software and Management in Technical Systems Department, Doctor of Technical Science, Professor. Tel. +7 846 228-00-13. E-mail: v.tarasov@psuti.ru

Bakhareva Nadezhda Fedorovna, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 77, Moskovskoe shosse, Samara, 443090, Russian Federation. Head of Informatics and Computer Technics Department, Doctor of Technical Science, Professor. Tel. +7 846 339-11-31. E-mail: n.bahareva@psuti.ru

References

1. Novitzky S. et al. Limiting the oscillations in queues with delayed information through a novel type of delay announcement. *Queueing Systems*, 2020, vol. 95, pp. 281–330. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11134-020-09657-9>
2. Novitzky S. et al. Nonlinear dynamics in queueing theory: determining the size of oscillations in queues with delay. *SIAM Journal on Applied Dynamical Systems*, 2019, vol.18, no. 1, pp. 279–311.
3. Tarasov V.N. Extension of the class of queueing systems with delay. *Avtomatika i telemekhanika*, 2018, no.12, pp. 57–70. (In Russ.)
4. Tarasov V.N., Ahmetshina E.G. Average waiting time in the H2/H2/1 queueing system with delay. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Fiziko-matematicheskie nauki*, 2018, vol. 22, no. 4. pp. 702–713. (In Russ.)
5. Tarasov V.N. Queueing systems with a time lag. *Informacionnye tekhnologii*, 2021, vol. 27, no. 6, pp. 291–298. (In Russ.)
6. Tarasov V.N. Spectral decomposition for QS-based delay model with Erlang and hyperexponential distributions. *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, 2022, vol. 25, no. 3, pp. 24–28. (In Russ.)

7. Kleinrock L. *Queueing theory*. Ed by V.I. Neimona. Transl. From English. Moscow: Mashinostroenie, 1979, 432 p. (In Russ.)
8. Do T.V., Chakka R., Sztrik J. Spectral expansion solution methodology for QBD-M processes and applications in future internet engineering. *Studies in Computational Intelligence*, 2016, vol. 479, pp. 131–142. DOI: 10.1007/978-3-319-00293-4-11
9. Ma X.A. et al. Spectral method for two-dimensional ocean acoustic propagation. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2021, no. 9, pp. 1–19. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse9080892>
10. Aliev T.I. *Fundamentals of discrete system modeling*. Saint Petersburgs: SPbGU ITMO, 2009, 363 p. (In Russ.)
11. Aliev T.I. Approximation of probability distributions in queueing models. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik informacionnyh tekhnologij, mekhaniki i optiki*, 2013, vol. 84, no. 2, pp. 88–93. (In Russ.)
12. Myskja A. An improved heuristic approximation for the GI/GI/1 queue with bursty arrivals. *Teletraffic and data traffic in a Period of Change: ITC-13*. Elsevier Science Publishers, 1991. pp. 683–688.
13. Whitt W. Approximating a point process by a renewal process: two basic methods. *Operation Research*, 1982, vol. 30, no. 1, pp. 125–147.
14. Gromoll H.C., Terwilliger B., Zwart B. Heavy traffic limit for a tandem queue with identical service times. *Queueing Systems*, 2018, vol. 89, no. 3, pp. 213–241.
15. Jacobovic R., Kella O. Asymptotic independence of regenerative processes with a special dependence structure. *Queueing Systems*, 2019, vol. 93, pp. 139–152. DOI: 10.1007/s11134-019-09606-1
16. Wang L., Kulkarni V. Fluid and diffusion models for a system of taxis and customers with delayed matching. *Queueing Systems*, 2020, vol. 96, pp. 101–131. DOI: 10.1007/s11134-020-09659-7
17. Legros B. M/G/1 queue with event-dependent arrival rates. *Queueing Systems*, 2018, vol. 89, no. 3, pp. 269–301.
18. Tarasov V.N., Bahareva N.F. Simulation model of a QS with hyperexponential distribution in the GPSS WORLD environment. *Infokommunikacionnye tekhnologii*, 2022, vol. 20, no. 4, pp. 7–13. (In Russ.)

Received 20.03.2024

СЕТИ СВЯЗИ И МУЛЬТИСЕРВИСНЫЕ УСЛУГИ

УДК 004.852

ВЫЯВЛЕНИЕ АНОМАЛИЙ ТРАФИКА В БОРТОВОЙ СЕТИ АВТОМОБИЛЯ С ПОМОЩЬЮ РЕКУРРЕНТНОЙ LSTM НЕЙРОСЕТИ

Трошин А.В.

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ

E-mail: a.v.troshin77@yandex.ru

В современных автомобилях высокого уровня применяется множество электронных блоков контроля и управления, повышающих удобство вождения и собирающих большие объемы информации о работе различных узлов. В значительной части такого автотранспорта для обмена сообщениями между электронными блоками применяется сеть контроллеров - надежное и простое решение, которое, однако, не обеспечивает никаких средств защиты передаваемых данных. Проблема уязвимости сети контроллеров все более обостряется по мере того, как возрастает обмен данными между автомобилями, дорожной инфраструктурой и Интернетом. Трафик атак на сеть контроллеров можно рассматривать как аномальный по отношению к легитимным сообщениям, что позволяет использовать для их обнаружения различного рода методы обнаружения аномалий. В данной работе рассматривается способ выявления аномалий трафика на базе рекуррентной нейросети с ячейками долгой краткосрочной памяти, спроектированной по архитектуре энкодер-декодер.

Ключевые слова: сеть контроллеров, обнаружение аномалий, обучение без учителя, кибербезопасность, рекуррентная нейросеть

Введение

Современный автотранспорт оснащается все большим количеством электронных датчиков и систем, обеспечивающих комфортное и безопасное вождение. Со временем данные системы станут настолько совершенными, что позволят добиться частичной или полной автономности управления.

Работа электронных систем автомобиля невозможна без надежного обмена данными, различают два вида интерфейсов связи: внутренние и внешние. Внутренние интерфейсы (in-vehicle) обеспечивают обмен данными между электронными блоками самого автомобиля, тогда как внешние интерфейсы служат для обмена данными с другим транспортным (V2V, Vehicle-to-Vehicle) или окружающей инфраструктурой (V2I, Vehicle-to-Infrastructure). Помимо этого, на значительной части автомобилей работают приложения, обменивающиеся данными со всемирной сетью Интернет. Поскольку для вождения необходимо тесное взаимодействие всех систем автомобиля, то в результате внутренние интерфейсы не являются больше полностью изолированными от внешних сетей и могут стать целью проведения сетевых атак [1–5].

Одним из стандартных решений для построения внутренних интерфейсов автомобилей является сеть контроллеров (CAN, Controller Area Network). CAN обеспечивает простой и надежный способ обмена данными между электронными блоками управления (ECU, Electronic Control Unit) (рисунок 1).

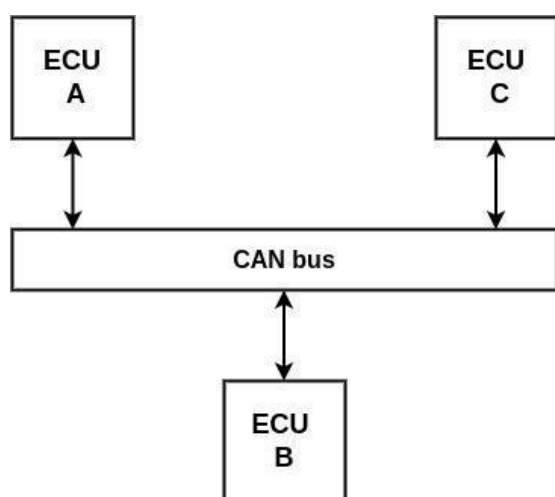


Рисунок 1. Блок-схема CAN

Все электронные блоки напрямую подключены к шине (CAN bus), данные по которой передаются в виде коротких кадров. Кадры рассылаются широкоэмиттерно всем блокам одновременно, для предотвращения коллизий блоки проверяют заня-

тость шины перед передачей. Разрешение коллизий производится путем побитового арбитража: при одновременной передаче блоки последовательно сравнивают каждый бит, и если они совпадают, то продолжают передачу; при несовпадении бит передачу продолжает блок, передающий логический ноль. Получение кадров без ошибок каждым блоком должно быть подтверждено путем отправки слота подтверждения, неверно принятые кадры направляются повторно [2; 5].

Стандартом CAN 2.0 определено четыре типа кадров:

- кадр данных (data frame);
- кадр удаленного запроса (remote frame);
- кадр перегрузки (overload frame);
- кадр ошибки (error frame).

Кадр данных используется для передачи данных между блоками. Кадр удаленного запроса применяется для запроса данных у определенного блока. Кадр перегрузки нужен для задержки передачи следующего кадра, чтобы текущий кадр успел быть обработан. Кадр ошибки служит для отправки сообщения об ошибке передачи текущего кадра.

Основная информация в кадрах передается в следующих полях:

- идентификация (ID);
- код длины данных (DLC);
- полезные данные (Payload).

Поле идентификации (ID, IDentification) служит для идентификации, передаваемого сообщения, а также задания его приоритета – чем больше логических нулей оно содержит, тем выше будет приоритет сообщения в случае арбитража.

Код длины данных (DLC, Data Length Code) содержит количество передаваемых байт данных. Полезные данные могут иметь длину от 0 до 8 байт.

Полезные данные (Payload) передаются в поле, размер которого задается DLC.

Как видно из описания стандартный вариант CAN не имеет никаких механизмов защиты от подделки кадров, что делает данную сеть легкой целью для проведения различного рода сетевых атак. Например, скомпрометированный ECU может наводить шину CAN поддельными сообщениями с наивысшим приоритетом 0x0000, что может привести к блокированию передачи кадров другими блоками. В свою очередь нарушения в работе CAN могут привести к очень серьезным последствиям в виде автомобильных аварий [2].

Поддельные кадры на шине CAN можно рассматривать как аномалии, имеющие определенные отличия от параметров нормального трафика, например, в значениях полей ID и DLC, которые не встречаются в обычных кадрах.

Для выявления аномалий сетевого трафика могут применяться следующие методы [11]:

- на базе сигнатур;
- статистические методы;
- методы машинного обучения.

В основе методов на базе сигнатур лежат правила, которые позволяют произвести проверку трафика на аномальность, например, на запрещенные значения полей кадров. Данные методы достаточно эффективны, однако требуют тщательной разработки и проверки правил, и не позволяют оперативно реагировать на появление новых видов сетевых атак.

В статистических методах аномалии рассматриваются как редкие события, сильно отклоняющиеся от усредненных параметров сетевого трафика. Данные методы позволяют обойтись без создания большого набора правил проверки, однако для их реализации необходимо определение точной стохастической модели сетевого трафика, что часто сложно реализовать на практике.

В основе методов машинного обучения для выявления аномалий лежат алгоритмы, которые позволяют получать критерии определения аномалий непосредственно из данных. Большинство методов машинного обучения относят к методам обучения с учителем (supervised learning) [7], так как они обучаются на заранее размеченных данных, разделенных на нормальные и аномальные экземпляры. Такие методы отличает высокая точность выявления аномалий, однако их недостатком является необходимость подготовки больших объемов размеченных данных для обучения, что является достаточно сложным и дорогостоящим процессом. Помимо этого, в случае появления новых видов сетевых атак, необходимо переобучение алгоритмов на данных, включающих этих атаки.

В методах обучения без учителя (unsupervised learning) алгоритмы самостоятельно структурируют неразмеченные данные, что значительно упрощает их практическое использование, кроме того, отсутствует необходимость в их переобучении [7]. К недостаткам методов обучения без учителя можно отнести их меньшую точность выявления аномалий.

На данный момент имеется несколько практических исследований по выявлению аномалий, связанных с атаками на CAN сети автомобилей [1–5]. В абсолютном большинстве из них для выявления аномалий применяются модели машинного обучения с учителем, основанные на искусственных нейросетях. Как было уже сказано, несмотря на высокую точность таких методов, они не позволяют оперативно реагировать на новые виды сетевых угроз.

В данной работе предлагается для выявления аномалий CAN использовать рекуррентную LSTM-нейросеть, построенную по архитектуре энкодер-декодер, в режиме обучения без учителя. Это позволит ее использовать для выявления как известных, так и ранее не применявшихся сетевых атак.

Архитектура рекуррентной нейросети

Простая рекуррентная нейронная сеть (RNN, Recurrent Neural Network) состоит из трех слоев нейронов: входного, скрытого и выходного, рисунок 2 [7]. В отличие от других типов нейросетей текущее состояние на выходах RNN зависит не только от сигналов на входе, но и от предыдущих состояний.

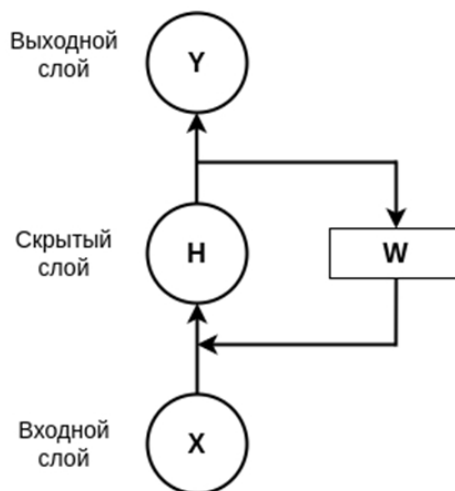


Рисунок 2. Вид простой RNN

Скрытый слой нейронов RNN в момент t определяется как:

$$\mathbf{H}_t = g(\mathbf{W}\mathbf{H}_{t-1} + \mathbf{U}\mathbf{x}_t + \mathbf{b})H,$$

где $\mathbf{W}$ и $\mathbf{U}$ – матрицы весов для скрытого слоя и входного слоя, соответственно; $\mathbf{x}$ – вектор входных нейронов; $\mathbf{b}$ – вектор смещений данного слоя; g – функция активации нейронов.

Преимуществом RNN в сравнении с другими типами нейросетей является учет временных зависимостей сигнала на входе от предыдущих состояний, главный недостаток – исчезновение градиента со временем, что не позволяет RNN обучать длительным взаимосвязям. Для устранения данного недостатка были разработаны RNN с элементами долгой краткосрочной памяти (LSTM, Long Short-Term Memory), которые могут учитывать хронологические взаимосвязи входного сигнала на длительных промежутках, однако LSTM требуют значительно больших вычислительных ресурсов для обучения [7].

Поскольку сетевые атаки на CAN приводят к нарушению нормального порядка передачи кадров

во времени, то для их выявления предлагается использовать LSTM-нейросеть по архитектуре энкодер-декодер (рисунок 3) [6; 8; 9].

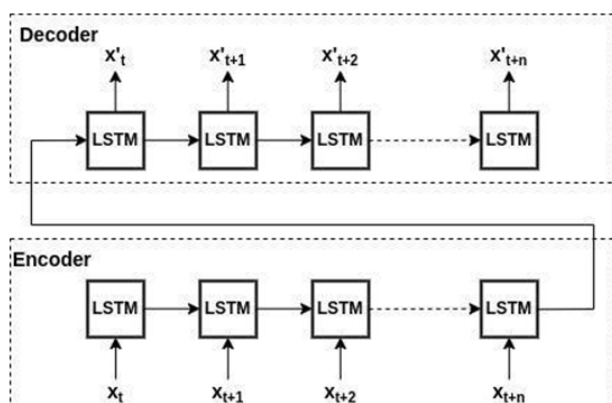


Рисунок 3. Сеть LSTM с архитектурой энкодер-декодер

Энкодер представляет собой цепочку LSTM-ячеек, на вход которых подается исходная временная последовательность длиной n : $\mathbf{X}_t = \{x_t, x_{t+1}, x_{t+2}, \dots, x_{t+n}\}$, где x_t – вектор из m -параметров в момент времени t . Целью энкодера является обучение наиболее характерным свойствам временной последовательности, которые запоминаются LSTM-ячейками. На выходе энкодера формируется выходной вектор из m -параметров, n -копий которого поступают на вход декодера.

Декодер представляет цепочку LSTM-ячеек, на выходах которых формируется последовательность $\mathbf{X}'_t$, которая является реконструкцией входной последовательности, таким образом, задачей LSTM-декодера является воссоздание исходной последовательности по главным свойствам, выявленным декодером.

В процессе обучения делается предположение о том, что аномальные экземпляры встречаются в тренировочных данных намного реже нормальных. В результате нейросеть обучается реконструированию нормальных данных по их наиболее характерным свойствам.

В режиме выявления аномалий входная последовательность оценивается на аномалию путем определения среднеквадратической ошибки реконструкции последовательности в момент времени t :

$$RMSE_t = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{t+i} - x'_{t+i})^2},$$

где n – размерность данных; x_{t+i} – вектор исходных параметров; x'_{t+i} – вектор реконструированных параметров.

Затем определяется усредненное значение RMSE для всех параметров, которое сравнивается с пороговым значением ϕ . При превышении

данного порога вся последовательность относится к аномалиям.

Качество выявления аномалий тем или иным методом оценивается с помощью таких параметров как точность и чувствительность [7; 11]. Точность (precision) определяется как отношение числа правильно отнесенных экземпляров к аномалиям, TP (True Positive) к общему числу экземпляров, отнесенных как правильно к аномалиям, так и неправильно FP (False Positive):

$$P = \frac{TP}{TP + FP}.$$

Чувствительность (recall) определяется как отношение числа правильно отнесенных случаев к аномалиям к общему числу аномалий в данных как выявленных, так и не выявленных FN (False Negative):

$$R = \frac{TP}{TP + FN}.$$

Следует отметить, что точность и чувствительность по-разному зависят от установленного порогового значения: с ростом порога точность выявления аномалий увеличивается, а чувствительность падает, поскольку растет число не выявленных аномалий.

Зависимость точности от чувствительности для разных пороговых значений представляется в виде кривой (precision recall curve), которая в идеальном случае имеет постоянный характер.

В связи с этим для общей оценки пригодности метода к выявлению аномалий используется усредненная оценка точности (average precision) по разным пороговым значениям:

$$AP = \sum_i (R_i - R_{i-1}) P_i,$$

где P_i и R_i – точность и чувствительность для порогового значения ϕ_i .

Использованные данные

Для оценки выявления аномалий рекуррентной нейросетью рассматриваемой архитектуры были использованы данные, подготовленные для соревнований по кибербезопасности [10]. Данные были собраны на автомобиле Hyundai Avante, в стационарном и движущемся состояниях, и представлены как нормальным трафиком, так и несколькими сетевыми атаками: флудинг, спуфинг, повтор и фазинг [1].

Целью флудинга (flooding) является перегрузка шины CAN кадрами с наименьшим идентификатором (0x000), чтобы затруднить передачу нормального трафика.

При спуфинге (spoofing) атакующий отправляет на шине CAN поддельные кадры с целью нарушения работы отдельных функций автомобиля.

Атака повтора (replay) заключается в захвате и повторной отправке по шине нормальных кадров, что может приводить к неверному срабатыванию ряда систем автомобиля.

Во время фазинга (fuzzing) атакующий отправляет по шине кадры со случайно сгенерированными полями, что может вызывать нарушения во время вождения. Данный вид атаки наиболее прост в осуществлении, так как не требует никаких знаний у атакующего о функционировании CAN данной модели или предварительного захвата и анализа трафика.

В набор данных включены такие параметры трафика как отметка времени захвата кадра, поля идентификации, длины и полезной нагрузки, а также класс трафика (нормальный или аномальный) и подкласс (тип атаки).

Результаты и выводы

Для моделирования весь собранных с шины CAN трафик был разбит на последовательности, состоящие из двух, следующих друг за другом кадров. Если в последовательность входит хотя бы один аномальный кадр, то вся она расценивается как аномальная.

Полученные таким образом данные были разделены на три части: для обучения (75%), тестирования (15%) и валидации (10%).

Для реализации рекуррентной LSTM-нейросети рассматриваемой архитектуры, был использован пакет TensorFlow, слой энкодера и декодера состоят из 32 LSTM-ячеек.

Оценка точности модели по выявлению аномалий проводилась при помощи функций пакета Scikit-Learn. Программный код, рассматриваемой модели, в формате Jupyter Notebook представлен в репозитории [12].

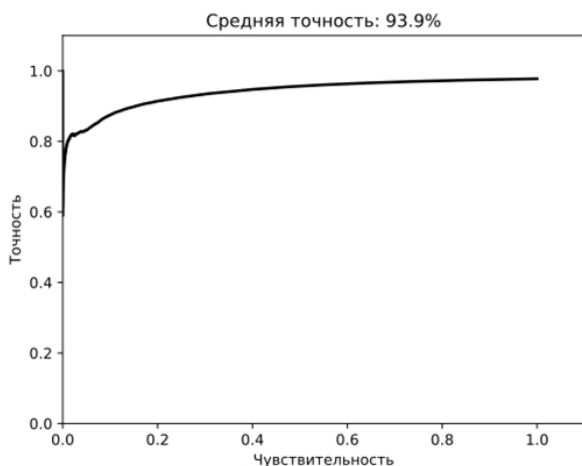


Рисунок 4. Результаты выявления аномалий трафика в сети стоящего автомобиля

Полученные результаты выявления аномалий для стоящего автомобиля представлены на рисунке 4.

Результаты для движущегося автомобиля приведены на рисунке 5.

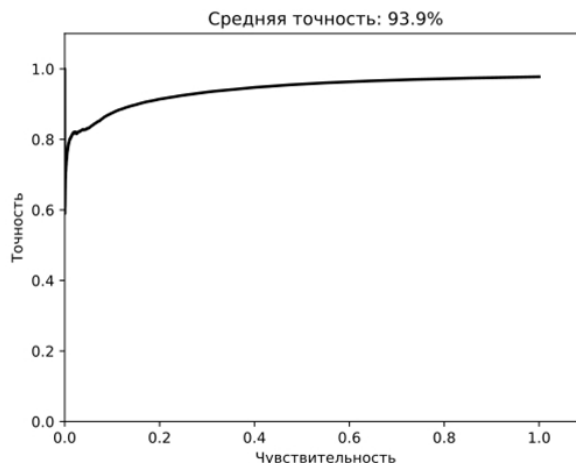


Рисунок 5. Результаты выявления аномалий трафика в сети движущегося автомобиля

Использование рассматриваемой рекуррентной нейросети позволяет достигнуть 94-95% точности выявления аномалий трафика сети CAN автомобиля, что является весьма высоким результатом для методов машинного обучения без учителя. Несмотря на то, что предлагаемый способ проигрывает в точности методам обучения с учителем, которые демонстрируют на базе нейросетей точность на уровне 99%, он не требует сложной и затратной подготовки данных для обучения. Тем не менее, следует отметить, что выявления аномалий трафика автомобиля требует очень высокой точности, так как неверное распознавание аномалий может привести к возникновению аварийных ситуаций во время движения. Поэтому предлагаемый способ может применяться для выявления аномалий трафика автотранспорта в связке с другими методами для гарантии общей безопасности их использования.

Литература

1. Car hacking and defense competition on in-vehicle network / H. Kang [et al.] // Third International Workshop on Automotive and Autonomous Vehicle Security. 2021. URL: <https://dx.doi.org/10.14722/autosec.2021.23035> (дата обращения: 20.11.2023).
2. CAN-ADF: The controller area network attack detection framework / S. Tariq [et al.] // Computers & Security. 2020. Vol. 94. P. 101857. DOI: 10.1016/j.cose.2020.101857
3. An intelligent secured framework for cyberattack detection in electric vehicles' CAN bus using machine learning / O. Avatefipour [et al.] // IEEE Access. 2019. Vol. 7. P. 127580–127592.

- DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2937576
4. Song H.M., Woo J., Kim H.K. In-vehicle network intrusion detection using deep convolutional neural networks // *Vehicular Communications*. 2020. Vol. 21. URL: <https://doi.org/10.1016/j.vehcom.2019.100198> (дата обращения: 10.12.2023).
 5. Anomaly detection for in-vehicle network using CNN-LSTM with attention mechanism / H. Sun [et al.] // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2021. Vol. 70, no. 10. P. 10880–10893. DOI: 10.1109/TVT.2021.3106940
 6. LSTM-Autoencoder-based anomaly detection for indoor air quality time-series data / Y. Wei [et al.] // *IEEE Sensors Journal*. 2023. Vol. 23, no. 4. P. 3787–3800. DOI: 10.1109/JSEN.2022.3230361
 7. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. *Deep Learning*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 2016. 800 p.
 8. Ergen T., Mirza A.H., Kozat S.S. Unsupervised and Semi-supervised Anomaly Detection with LSTM Neural Networks. 2017. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1710.09207> (дата обращения: 20.11.2023).
 9. Reconstruction-based LSTM-Autoencoder for Anomaly-based DDoS Attack Detection over Multivariate Time-Series Data / Y. Wei [et al.] // 2023. URL: <https://arxiv.org/abs/2305.09475> (дата обращения: 20.11.2023).
 10. Car-Hacking: Attack & Defense Challenge 2020 Dataset. URL: <https://ieee-dataport.org/open-access/car-hacking-attack-defense-challenge-2020-dataset> (дата обращения: 25.11.2023).
 11. Трошин А.В. Обнаружение аномалий трафика сети с помощью методов понижения размерности // *Инфокоммуникационные технологии*. 2022. Т. 20, № 4 (80). С. 34–43. DOI: 10.18469/ikt.2022.20.4.05
 12. Troshin A. Car hacking detection by LSTM neural network. URL: https://github.com/av-troshin77/car_hacking (дата обращения: 25.11.2023).

Получено 15.04.2024

Трошин Александр Викторович, к.т.н., доцент кафедры сетей и систем связи Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики. 443010, Российская Федерация, г. Самара, ул. Л. Толстого, 23. Тел. +7 846 339-11-26. E-mail: a.v.troshin77@yandex.ru

TRAFFIC ANOMALY DETECTION IN VEHICLE BUS BY RECURRENT LSTM NEURAL NETWORK

Troshin A.V.

*Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russian Federation
E-mail: a.v.troshin77@yandex.ru*

Modern high-end cars have many electronic control units for driving assistance that combine huge amounts of data about the functioning of car components. A significant part of these vehicles use a controller area network for communication between electronic units. Controller area network is a simple and reliable network protocol that due to its simplicity lacks any security mechanisms for data transmission. The problem of controller area network vulnerability is worsening as constantly growing amounts of data between cars, road infrastructure and the Internet. The traffic of attacks on controller area networks can be treated as abnormal that allows using anomaly detection methods for their recognition. In this work we propose the recurrent long short-term memory encoder-decoder neural network for controller area network attacks detection.

Keywords: *controller area network, anomaly detection, long short-term memory, unsupervised learning, network attacks, cybersecurity*

DOI: 10.18469/ikt.2023.21.4.02

Troshin Alexander Victotovich, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 23, L. Tolstoy Street, Samara, 443010, Russian Federation; Assistant Professor of Networks and Systems of Telecommunication Department, PhD in Technical Science. Tel. +7 846 339-11-26. E-mail: a.v.troshin77@yandex.ru

References

1. Kang H. et al. Car hacking and defense competition on in-vehicle Network. *Third International*

- Workshop on Automotive and Autonomous Vehicle Security*, 2021. URL: <https://dx.doi.org/10.14722/autosec.2021.23035> (accessed: 20.11.2023).
2. Tariq S. et al. CAN-ADF: The controller area network attack detection framework. *Computers & Security*, 2020, vol. 94, pp. 101857. DOI: 10.1016/j.cose.2020.101857
 3. Avatefipour O. et al. An intelligent secured framework for cyberattack detection in electric vehicles' CAN bus using machine learning. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 127580–127592. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2937576
 4. Song H.M., Woo J., Kim H.K. In-vehicle network intrusion detection using deep convolutional neural networks. *Vehicular Communications*, 2020, vol. 21. URL: <https://doi.org/10.1016/j.vehcom.2019.100198> (accessed: 10.12.2023).
 5. Sun H. et al. Anomaly detection for in-vehicle network using CNN-LSTM with attention mechanism. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, vol. 70, no. 10, pp. 10880–10893. DOI: 10.1109/TVT.2021.3106940
 6. Wei Y. et al. LSTM-Autoencoder-based anomaly detection for indoor air quality time-series data. *IEEE Sensors Journal*, 2023, vol. 23, no. 4, pp. 3787–3800. DOI: 10.1109/JSEN.2022.3230361
 7. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. *Deep Learning*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 2016. 800 p.
 8. Ergen T., Mirza A.H., Kozat S.S. Unsupervised and Semi-supervised Anomaly Detection with LSTM Neural Networks, 2017. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1710.09207> (accessed: 20.11.2023).
 9. Wei Y. et al. Reconstruction-based LSTM-Autoencoder for Anomaly-based DDoS Attack Detection over Multivariate Time-Series Data, 2023. URL: <https://arxiv.org/abs/2305.09475> (accessed: 20.11.2023).
 10. Car-Hacking: Attack & Defense Challenge 2020 Dataset. URL: <https://iee-dataport.org/open-access/car-hacking-attack-defense-challenge-2020-dataset> (accessed: 25.11.2023).
 11. Troshin A.V. Network traffic anomaly detection by dimensionality reduction methods. *Infokommunikacionnye tehnologii*, 2022, vol. 20, no. 4, pp. 34–43. DOI: 10.18469/ikt.2022.20.4.05 (In Russ.)
 12. Troshin A. Car Hacking Detection by LSTM Neural Network. URL: https://github.com/avtroshin77/car_hacking (accessed: 25.11.23).

Received 15.04.2024

УДК 621.391: 621 39

СРАВНЕНИЕ ГИПЕРЭКСПОНЕНЦИАЛЬНЫХ И ГРУППОВЫХ ПУАССОНОВСКИХ МОДЕЛЕЙ ТРАФИКА МУЛЬТИСЕРВИСНЫХ СЕТЕЙ СВЯЗИ

Лихтциндер Б.Я.¹, Привалов А.Ю.²

¹ Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ

² Самарский национальный исследовательский университет имени С.П.Королева, Самара, РФ

E-mail: b.lihtcinder@psuti.ru, privalov1967@gmail.com

Целью работы было проведение сравнения гиперэкспоненциальных и групповых пуассоновских потоков заявок в качестве моделей пачечного трафика мультисервисных сетей связи. Рассматриваются различные модели трафика для задачи приближения средней очереди, создаваемой видеотрафиком современных мультисервисных сетей. Рассмотрены пуассоновский и гиперэкспоненциальный потоки, как ординарные, так и групповые. Показано, что для задачи приближения очереди видеотрафика подходят групповые потоки обоих типов. Групповые пуассоновские потоки позволяют получить весьма простые аналитические зависимости средних значений очередей от коэффициента загрузки систем массового обслуживания и поэтому являются наиболее предпочтительными. Показана неадекватность применения ординарных гиперэкспоненциальных моделей для аппроксимации пачечных потоков заявок, поскольку, при малых значениях коэффициента загрузки, зависимости средних значений очередей для гиперэкспоненциальных потоков практически близки к нулю, в то время, как указанные зависимости для пачечных потоков имеют весьма значительный угол наклона. Сделанные выводы подтверждаются результатами имитационного моделирования.

Ключевые слова: видеотрафик, пуассоновский поток, гиперэкспоненциальный поток, групповые потоки

Введение

Одной из наиболее популярных моделей телекоммуникационного трафика, являются гиперэкспоненциальные потоки, для которых функция распределения вероятностей интервалов между соседними заявками имеет вид [1]:

$$F(x) = 1 - \sum_{i=1}^k p_i e^{-\lambda_i x}.$$

Промежутки времени между соседними заявками в гиперэкспоненциальном потоке описываются экспоненциальными распределениями, однако, параметр распределения для различных промежутков времени может быть разным, причем, с вероятностью p_i , ($i = 1, \dots, k$) параметр распределения потока равен λ_i , а $\sum_{i=1}^k p_i = 1$.

Весь процесс образования потока может быть разбит на отдельные, чередующиеся фазы, причем, длительность каждой фазы будет равной одному промежутку времени между соседними заявками, а фазы чередуются случайным образом независимо друг от друга. Случайный промежуток времени между двумя любыми соседними заявками во всем потоке обозначен символом θ .

Рассмотрим систему массового обслуживания (СМО), в которой заявки поступают и обслуживаются по гиперэкспоненциальным законам второго порядка (система $H2 / H2 / 1$).

Входной поток заявок задан распределением, вида:

$$F(\theta) = 1 - a_1 e^{-\lambda_1 \theta} - a_2 e^{-\lambda_2 \theta},$$

а поток событий обслуживания задан распределением вида:

$$\Phi(\tau) = 1 - b_1 e^{-\mu_1 \tau} - b_2 e^{-\mu_2 \tau},$$

где τ – интервал времени обслуживания одной заявки, μ_i интенсивность обслуживания заявок на i -й фазе, b_i – вероятность i -й фазы обслуживания.

СМО с гиперпуассоновскими потоками хорошо изучены. Еще в середине прошлого века для подобных распределений было получено соотношение, непосредственно определяющее среднее время ожидания T_{ia} в очередях одноканальной СМО [1].

$$T_{ia} = \frac{(\mu_1 + \xi_1)(\mu_2 + \xi_1)}{(-\xi_1)\mu_1\mu_2(1 - \frac{\xi_1}{\xi_2})} + \frac{(\mu_1 + \xi_2)(\mu_2 + \xi_2)}{(-\xi_2)\mu_1\mu_2(1 - \frac{\xi_2}{\xi_1})},$$

где ξ_1 и ξ_2 – корни уравнения

$$\left(\frac{a_1 \lambda_1}{\lambda_1 - s} + \frac{a_2 \lambda_2}{\lambda_2 - s}\right) \left(\frac{b_1 \mu_1}{\mu_1 + s} + \frac{b_2 \mu_2}{\mu_2 + s}\right) = 1,$$

лежащие в левой полуплоскости $\text{Re}(s) < 0$.

Там же рассмотрены модели СМО с входными потоками и гиперэкспоненциальными распреде-

лениями интервалов обработки заявок, наряду с моделями с гиперэкспоненциальными входными потоками и эрланговскими распределениями интервалов обработки заявок.

Все рассмотренные выше модели предполагают отсутствие в потоках корреляционных связей и полную взаимную независимость поступающих заявок и временных интервалов их обработки. Подобные допущения ограничивают область применения гиперэкспоненциальных моделей при анализе реальных потоков мультисервисных сетей связи, заявки в которых носят пачечный характер и существенно коррелируют между собою.

Групповые гиперэкспоненциальные модели

Нами предлагается гиперэкспоненциальный групповой поток – это поток независимых событий, в котором интервалы между соседними событиями распределены по гиперэкспоненциальному закону, т.е. образуют отдельные фазы. Также, как это происходит в обычном гиперэкспоненциальном потоке, длительность каждой фазы равна одному промежутку времени между соседними событиями, а фазы чередуются случайным образом, независимо друг от друга. Однако, в отличие от обычного гиперэкспоненциального потока, в котором в качестве событий выступают отдельные заявки, здесь каждое событие заключается в одновременном появлении в момент t_k «пачки» из μ_k независимых случайно распределенных чисел заявок. Для гиперэкспоненциального потока второго порядка имеем всего две фазы, последовательно и независимо следующие друг за другом с вероятностями p и $(1-p)$.

$$F(\theta) = 1 - p e^{-\lambda_1 \theta} - (1-p) e^{-\lambda_2 \theta}.$$

Вероятности чисел заявок в «пачках» на каждой из фаз могут быть распределены по различным законам: f_{1k} и f_{2k} .

Для демонстрации возможностей ординарного и группового гиперэкспоненциальных потоков, приведем далее результаты имитационного моделирования для средней очереди в СМО с постоянным значением времени обслуживания.

На рисунке 1 приведены зависимости средней очереди от загрузки прибора для ординарного гиперэкспоненциального потока с параметрами $p = 0,5$, $\lambda_1 = 30$, $\lambda_2 = 6$ и группового гиперэкспоненциального потока с параметрами $p = 0,5$, $\lambda_1 = 3$, $\lambda_2 = 0,6$, все пачки имеют постоянный размер 10.

Видно, что наклон кривой при малых загрузках близок к нулю для обоих потоков, что говорит о малой пригодности гиперэкспоненциальных и даже групповых гиперэкспоненциальных моделей

потоков с малыми размерами пачек пакетов, для аппроксимации зависимостей очередей в СМО мультисервисных систем. При повышении интенсивности высокочастотной составляющей ординарного гиперэкспоненциального потока, он стремится к групповому пуассоновскому потоку с геометрическим распределением чисел заявок в «пачке».

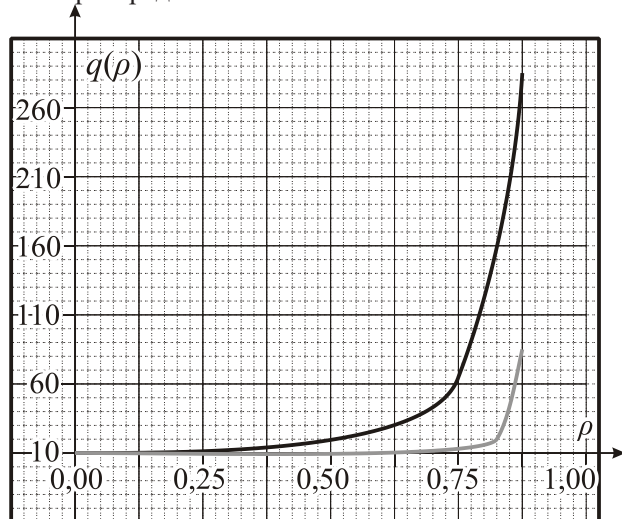


Рисунок 1. Зависимости размеров средних очередей группового гиперэкспоненциального и обычного гиперэкспоненциального потоков от коэффициента загрузки ρ

Групповые пуассоновские модели потоков

Другой моделью обобщения пуассоновских потоков, сочетающей в себе простоту анализа, свойственную классическим пуассоновским моделям и возможность учета пачечного характера современного пакетного трафика являются *групповые потоки* Пуассона. [4; 6; 12].

Они обобщают пуассоновские потоки и являются альтернативой моделям, учитывающим *фрактальные* свойства потоков [2; 3; 8–11], которые, в виду весьма высокой сложности, нашли ограниченное применение на практике.

В таких потоках выполняются свойство стационарности и отсутствия последствия, но не выполняется свойство ординарности.

Групповой пуассоновский поток – это поток независимых событий с параметром λ . Интервалы между соседними событиями распределены по экспоненциальному закону. Каждое событие заключается в одновременном появлении в момент t_k «пачки» из μ_k независимых случайно распределенных чисел заявок, с распределением f_k . Примем, что τ – это интервал времени обработки одной заявки в некоторой СМО. Разделим достаточно большой промежуток времени T , в течение которого действует поток указанных событий, на N_τ таких по-

следовательных интервалов. Пусть $m_i(\tau)$ – число событий, произошедших в течение i -го интервала времени τ . Тогда вероятности наступления на интервале τ ровно n событий подчиняются закону Пуассона:

$$P\{m_i(\tau) = n\} = P_n(\lambda\tau) = \frac{(\lambda\tau)^n}{n!} e^{-\lambda\tau}.$$

Нами получены соотношения, определяющие зависимости математического ожидания $\overline{m(\tau)}$ и дисперсии $D_m(\tau)$ чисел заявок, поступающих в течение интервалов τ [6].

$$\overline{m(\tau)} = \lambda\tau\bar{k}, \quad (1)$$

$$D_m(\tau) = \rho\bar{k}(1 + \nu_k^2) = E\rho,$$

где $\bar{k}$ – среднее число заявок в «пачке» $\rho = \lambda\tau\bar{k} = \overline{m(\tau)}$ – общий коэффициент загрузки; $\nu_k^2 = \frac{D_k}{(\bar{k})^2}$ – квадрат коэффициента вариации чисел заявок в пачках. Дисперсия $D_m(\rho)$ линейно зависит от коэффициента загрузки ρ (рисунок 2), так же, как это бывает в обычном пуассоновском потоке, где $D_m(\rho) = \rho$.

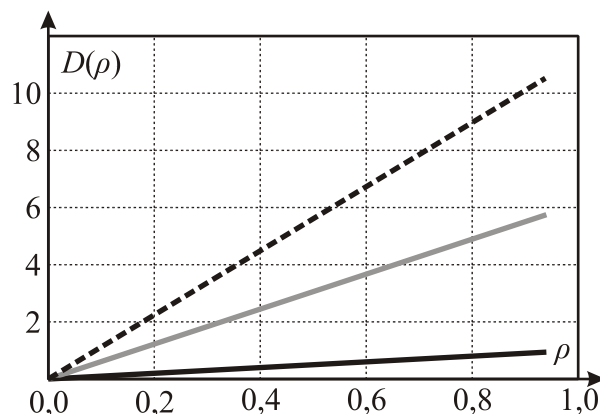


Рисунок 2. Зависимости дисперсий групповых потоков от коэффициента загрузки

Средние значения очередей в системах массового обслуживания с групповыми пуассоновскими потоками.

С применением интервального метода анализа трафика, нами была получена зависимость средних размеров очередей для одноканальных СМО [5].

$$\overline{q(\rho)} = \frac{D_m(\rho) + 2\mu_{q_{i-1}m_i}(\rho)}{2(1 - \rho)} - \frac{\rho}{2},$$

Здесь $D_m(\rho)$ – дисперсия $m_i(\rho)$, а $\mu_{q_{i-1}m_i}(\rho)$ – второй взаимный центральный момент последовательностей $q_{i-1}(\rho)$ и $m_i(\rho)$, называемый ковариационным моментом или ковариацией. Он определяется, как математическое ожидание произведений центрированных значений элементов $q_{i-1}(\tau)$ и $m_i(\tau)$.

Рассмотрим указанную формулу применительно к модели группового пуассоновского потока. Дисперсия $D_m(\rho)$ определяется соотношением (1), а $\mu_{q_i, m_i}(\rho) = 0$ ввиду независимости событий в рассматриваемом потоке. Следовательно, для рассматриваемых групповых пуассоновских потоков получаем простое соотношение

$$\overline{q(\rho)} = \frac{\rho E}{2(1 - \rho)} - \frac{\rho}{2}.$$

Для обычного пуассоновского потока $E = 1$, получаем известную формулу Хинчина-Поллачека для СМО с постоянным значением времени обслуживания.

Наклон кривой, реализуемой зависимостью (1) на начальном участке, при весьма малых значениях коэффициента загрузки определяется производной $\overline{q(0)} = E - 1$.

На рисунке 3 представлены полученные в результате имитационного моделирования зависимости размеров средних очередей для обычного пуассоновского (нижняя кривая) потоков и группового пуассоновского (верхняя кривая).

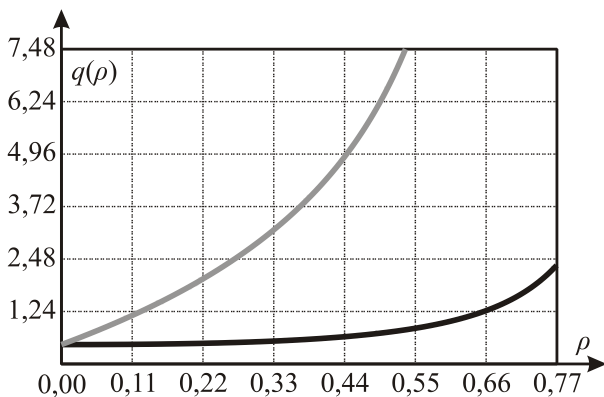


Рисунок 3. Зависимости размеров средних очередей группового пуассоновского и обычного пуассоновского потоков от коэффициента загрузки ρ

В верхнем углу рисунка 3 показано значение размера очереди для группового потока, при коэффициенте загрузки $\rho = 0,5$, полученное непосредственно с графика, $\overline{q(\rho)} = 5,186$. Теоретическое значение, определенное по формуле (5), $\overline{q(\rho)} = 5,25$. Незначительная разница объясняется погрешностью процесса имитационного моделирования. Как и следовало ожидать, наклон кривой для пуассоновского потока при малых значениях коэффициента загрузки практически равен нулю. Это свойство является основной причиной препятствующей хорошей аппроксимации зависимостей очередей в СМО мультисервисных сетей с помощью пуассоновских и гиперэкспоненциальных моделей трафика.

На рисунке 4 представлены результаты приближения очереди реального видеотрафика с помощью

группового пуассоновского и гиперэкспоненциального потоков для малых значений загрузки канала. Сверху вниз: групповой пуассоновский поток-2, реальный трафик-1, групповой гиперэкспоненциальный поток-3, ординарный гиперэкспоненциальный поток-4, который имеет следующие параметры: отношение интенсивности высокочастотной фазы к интенсивности низкочастотной фазы – равно 20, вероятность высокочастотной фазы P – равна 0,95.

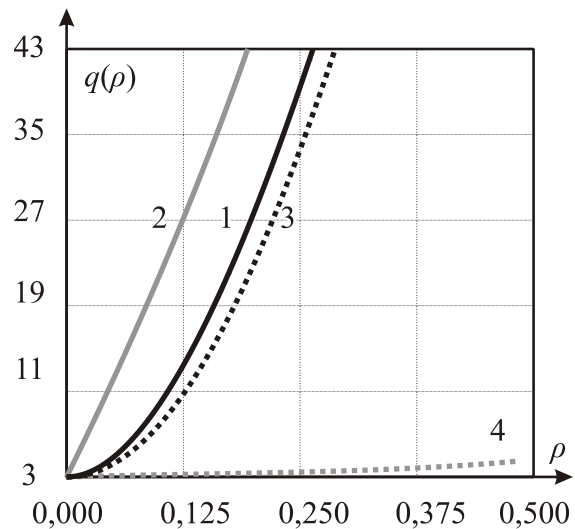


Рисунок 4. Зависимости размеров средних очередей реального трафика и приближений

Из графиков следует, что ординарный гиперпуассоновский поток совершенно не пригоден в качестве модели видеотрафика, поскольку даже при самом широком изменении параметров, средние размеры его очередей при малых загрузках изменяются весьма незначительно.

Заключение

Таким образом, в работе продемонстрировано, что ординарные потоки, как пуассоновские, так и гиперэкспоненциальные, малоприспособны для аппроксимации очередей, образуемых реальным видеотрафиком современных мультисервисных сетей. Для хорошей аппроксимации можно использовать групповые потоки обоих типов. Однако, групповые пуассоновские потоки позволяют получить весьма простые аналитические зависимости средних значений очередей от коэффициента загрузки систем массового обслуживания и поэтому являются наиболее предпочтительными.

Литература

1. Основы моделирования сложных систем: учебное пособие для вузов / Л.М. Дыхненко [и др.]; под общей ред. И.В. Кузьмина. Киев: Выща школа, 1981. 359 с.
2. Вишневский В.М., Дудин А.Н. Системы мас-

- сового обслуживания с коррелированными входными потоками и их применение для моделирования телекоммуникационных сетей // Автоматика и телемеханика. 2017. № 8. С. 3–59.
3. Neuts M.F. Versatile Markovian point process // Journal of Applied Probability. 1979. Vol. 16, no. 4. P. 764–779. DOI: <https://doi.org/10.2307/3213143>.
 4. Дудин А.Н., Клименок В.И. Системы массового обслуживания с коррелированными потоками. Минск: БГУ, 2000. 175 с.
 5. Лихтциндер Б.Я. Трафик мультисервисных сетей доступа (интервальный анализ и проектирование). М.: Горячая линия-Телеком, 2018. 290 с.
 6. Likhtsinder B.Ya., Bakay Yu.O. Models of group Poisson flows in telecommunications traffic control // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2020. Т. 28, № 3. С. 75–89.
 7. Likhtsinder B.Ya., Kitaeva E.V., Privalov A.Yu. Queue analysis for video traffic using the generalized interval method // Information Technology and Nanotechnology (ITNT-2022): VIII International Conference. Samara, 2022. P. 1–4. DOI: 10.1109/ITNT55410.2022.9848604
 8. Ramaswami V. The N/G/1 queue and its detailed analysis // Advances in Applied Probability. 1980. Vol. 12, no. 1. P. 222–261. DOI: <https://doi.org/10.2307/1426503>
 9. Lakatos L., Szeidl L., Telek M. Introduction to Queueing Systems with Telecommunication Applications. Springer, 2013. 388 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-5317-8>
 10. Singh G., Gupta U.C., Chaudhry M.L. Detailed computational analysis of queueing time distributions of the BMAP/G/1 queue using roots // Journal of Applied Probability. 2016. Vol. 53. P. 1078–1097.
 11. Dudin A.N., Piscopo R., Manzo R. Queue with group admission of customers // Computer and Operations Research. 2015. Vol. 61. P. 89–90.
 12. Лихтциндер Б.Я., Моисеев В.И., Привалов А.Ю. Вторые моменты очередей в системах массового обслуживания с групповыми пуассоновскими потоками // Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ-2023): материалы IX Международной конференции и молодежной школы. Самара, 2023. P. 050192.

Получено 20.11.2023

Лихтциндер Борис Яковлевич, д.т.н., профессор, профессор кафедры сетей и систем связи Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики. 443010, Российская Федерация, г. Самара, ул. Л. Толстого, 23. Тел. +7 846 333-47-69. E-mail: lixt@psuti.ru

Привалов Александр Юрьевич, д.т.н., профессор, профессор кафедры прикладной математики и физики Самарского национального исследовательского университета имени С.П. Королева. 443086, Самара, Московское шоссе, 34. Тел. +7 846 332-56-07. E-mail: privalov1967@gmail.com

COMPARISON OF HYPEREXPONENTIAL AND GROUP POISSON TRAFFIC MODELS OF MULTISERVICE COMMUNICATION NETWORKS

Lichtzinder B.Ya.¹, Privalov A.Yu.²

¹ *Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russian Federation*

² *Samara National Research University, Samara, Russian Federation*

E-mail: b.lihtcinder@psuti.ru, privalov1967@gmail.com

The goal of the study was to compare hyperexponential and group Poisson flows of requests as models of burst traffic of multiservice communication networks. Various traffic models are considered for the problem of approximating the average queue created by video traffic of modern multiservice networks. Poisson and hyperexponential flows, both ordinary and group, are also considered. It is shown that group flows of both types are suitable for the task of approximating the video traffic queue. Group Poisson flows make it possible to obtain very simple analytical dependences of the average values of queues on the load factor of queueing systems and are therefore the most preferable. The inadequacy of using ordinary hyperexponential models for approximating burst flows of requests is also provided shown, since, at low values of the load factor, the dependences of the average values of queues for hyperexponential flows are practically close to zero, while the indicated dependences for burst flows have a very significant slope angle. The conclusions drawn are confirmed by the results of simulation modeling.

Keywords: *video traffic, Poisson flow, hyper exponential flow, group flows*

DOI: 10.18469/ikt.2023.21.4.03

Likhttsinder Boris Yakovlevich, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 23, L. Tolstoy Street, Samara, 443010, Russian Federation; Doctor of Technical Science, Professor of Networks and Communication Systems Department. Tel. +7 846 333-47-69. E-mail: lixt@psuti.ru

Privalov Alexander Yurievich, Samara National Research University, 34, Moskovskoye shosse, Samara, 443086, Russian Federation; Professor of the Chair of Applied Mathematics and Physics, Doctor of Technical Science. Tel. +7 846 332-56-07. E-mail: privalov1967@gmail.com

References

1. Dyhnenko L.M. et al. *Fundamentals of modeling complex systems: Textbook for University*. Ed. by I.V. Kuzmin. Kiev: Vyshcha shkola, 1981. 359 p. (In Russ.)
2. Vishnevsky V.M., Dudin A.N. Queueing systems with correlated arrival flows and their applications to modeling telecommunication networks. *Avtomatika i telemekhanika*, 2017, no. 8, pp. 3–59. (In Russ.)
3. Neuts M.F. Versatile Markovian point process. *Journal of Applied Probability*, 1979, vol. 16, no. 4, pp. 764–779. DOI: <https://doi.org/10.2307/3213143>. (In Russ.)
4. Dudin A.N., Klimenok V.I. *Queueing systems with correlated flows*. Minsk: BSU, 2000. 175 p. (In Russ.)
5. Lichtzinder B.Ya. *Traffic of multiservice access networks (interval analysis and design)*. Moscow: Goryachaya liniya-Telekom, 2018, 290 p. (In Russ.)
6. Likhttsinder B.Ya., Bakay Yu.O. Models of group Poisson flows in telcommunications traffic control. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki*, 2020, vol. 28, no. 3, pp. 75–89.
7. Likhttsinde B.Ya., Kitaeva E.V., Privalov A.Yu. Queue analysis for video traffic using the generalized interval method. *Information Technology and Nanotechnology (ITNT-2022): VIII International Conference*. Samara, 2022, pp. 1–4. DOI: 10.1109/ITNT55410.2022.9848604
8. Ramaswami V. The N/G/1 queue and its detailed analysis. *Advances in Applied Probability*, 1980, vol. 12, no. 1, pp. 222–261. DOI: <https://doi.org/10.2307/1426503>
9. Lakatos L., Szeidl L., Telek M. *Introduction to Queueing Systems with Telecommunication Applications*. Springer, 2013, 388 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-5317-8>
10. Singh G., Gupta U.C., Chaudhry M.L. Detailed computational analysis of queueing time distributions of the BMAP/G/1 queue using roots. *Journal of Applied Probability*, 2016, vol. 53, pp. 1078–1097.
11. Dudin A.N., Piscopo R., Manzo R. Queue with group admission of customers. *Computer and Operations Research*, 2015, vol. 61, pp. 89–90.
12. Lichtzinder B.Ya., Moiseev V.I., Privalov A.Yu. Second moments of queues in queueing systems with group Poisson flows. *Informacionnye tekhnologii i nanotekhnologii n (ITNT-2023): materialy IX Mezhdunarodnoj konferencii i molodezhnoj shkol*. Samara, 2023, pp. 050192. (In Russ.)

Received 20.11.2023

СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

УДК 004.032.26

ГРУППОВЫЕ ГАММА-ПОТОКИ И НЕЙРОСЕТИ В МОДЕЛИРОВАНИИ СОВРЕМЕННОГО ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОГО ТРАФИКА

Лихтциндер Б.Я.¹, Привалов А.Ю.², Максимова Т.Д.¹

¹ Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ

² Самарский национальный исследовательский университет имени С.П. Королева, Самара, РФ
E-mail: lixt@psuti.ru, privalov.ayu@ssau.ru, td.pavlova@psuti.ru

В данной работе в качестве цели моделирования телекоммуникационного трафика рассматривается образование очередей в системе M/D/1 с близкими к реальным статистическим характеристикам первых двух порядков. В качестве входного в систему рассматривается групповой поток с постоянным размером пачки и расстоянием между прибытиями, подчиняющимся принципу гамма-распределения. Эти параметры определяются с помощью нейронной сети, которая обучена определять параметры таких входных потоков по статистическим характеристикам очереди при различных нагрузках прибора. Получены и представлены результаты, демонстрирующие хорошее приближение при аппроксимации с использованием гамма-потоков, параметры которых оцениваются с помощью нейросети. Показана практическая полезность рассматриваемого подхода и перспективы использования нейросетей для решения практических задач с применением теории очередей.

Ключевые слова: система массового обслуживания, неординарный входной поток, моменты очереди, нейронная сеть, гамма-распределение

Введение

При моделировании сетей телекоммуникаций часто необходимо имитировать поведение очереди, создаваемой реальным трафиком в узлах сети. При этом, совпадение статистических характеристик самого модельного трафика с реальным прототипом может быть не так важно, как совпадение статистических характеристик, создаваемых этими двумя трафиками очередей.

Примером такой ситуации может служить моделирование прохождения некоторого потока, называемого меченым, через телекоммуникационный узел, моделируемый системой массового обслуживания. Кроме меченого, через этот узел проходят и другие потоки, называемые фоновыми. Они интересуют нас лишь постольку, поскольку создают очередь, в которой участвует и меченый поток. Поэтому относительно фоновых потоков (в отличие от меченого) нам важны именно характеристики создаваемой ими очереди, а не характеристики трафика, как такового.

В [1] показано, как групповой пуассоновский поток может использоваться в такого рода задачах. Его использование удобно, так как параметры потока, приближающие очередь, им создаваемую, к реальной очереди, могут быть найдены аналитическим путем. Однако, приближение может быть не слишком хорошим.

В данной работе мы предлагаем новый подход к решению такой задачи. В качестве модельного трафика предлагается использовать групповой поток, в котором интервал между прибытиями пачек заявок подчиняется принципу гамма-распределения. Экспоненциальное распределение интервала между прибытиями, при котором такой поток становится пуассоновским, является частным случаем гамма-распределения. Таким образом, модель группового гамма-потока оказывается шире по своим возможностям, чем групповой пуассоновский поток.

Однако, для гамма-потока отсутствуют аналитические формулы в отношении статистических характеристик очереди в системе массового обслуживания, а вычисление параметров потока, прибли-

жающих реальную очередь, сопряжено с большими сложностями, так как на каждом шаге минимизации различий между статистическими характеристиками очередей приходится производить имитационное моделирование очереди гамма-потока с очередным подбором пробных значений параметров.

В данной работе мы предлагаем следующий подход к этой проблеме – обучить нейронную сеть оценивать параметры гамма-потока, создающего очередь, подавая ей на вход данные о зависимости средней очереди и дисперсии очереди от загрузки прибора (канала). После обучения на вход такой нейросети мы подадим данные об очереди, создаваемой реальным трафиком, и она оценит параметры гамма-потока, наиболее близкого к реальному.

Понятно, что обучение нейросети – процесс, подразумевающий высокую сложность вычислений. Но зато после обучения, оценка параметров для подаваемых на вход данных происходит практически мгновенно.

Заметим, что применение нейросетей в задачах, относимых к теории очередей, пока не очень распространено. В [2] приведен обзор современного состояния при применении машинного обучения (в том числе нейросетей) для задач теории очередей, из которого видно, что до сего времени нейронные сети использовались только для оценки параметров самих систем массового обслуживания с известной структурой, когда им на вход подавался известный трафик. В данной же работе предлагается использование нейросетей для оценки параметров входного трафика в систему массового обслуживания, и такой вид использования представляется новым. В данной работе приведены результаты, демонстрирующие возможность применения такого подхода.

Модель группового гамма-потока.

Постановка задачи

Рассматривается поток заявок, в котором заявки всегда приходят пачками по B штук, где $B = const$ – параметр модели. Интервалы времени между прибытиями пачек заявок являются независимыми одинаково распределенными случайными величинами.

нами, подчиняющимися принципу гамма-распределения с плотностью:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{x^{k-1} e^{-x/\theta}}{\theta^k \Gamma(k)}, & x \geq 0; \\ 0, & x < 0. \end{cases}$$

где k и θ – параметры распределения. В такой параметризации θ – это параметр масштаба, и в нашем случае его можно приравнять к 1. Таким образом, поток заявок задается двумя параметрами – k и B .

Этот поток является входным для системы массового обслуживания (СМО) G/D/1. Постоянное время обслуживания заявки τ задается таким образом, чтобы коэффициент загрузки прибора ρ был бы равен заданному: $\tau = \rho M(X) = \rho k$ (так как $M(X) = \theta$).

Обозначим через $Q_i(\rho)$ $t \geq 0$ очередь в данной СМО с коэффициентом загрузки прибора ρ в момент времени t , а через $\overline{Q(\rho)}$ и $DQ(\rho)$ – эмпирические математическое ожидание и дисперсию очереди, полученные по достаточно продолжительной реализации $Q_i(\rho)$.

Для каждого значения $\{\rho_n\}_{n=1,\dots,N}$ из некоторого набора, рассмотрим соответствующие множества $\{\overline{Q(\rho_n)}\}_{n=1,\dots,N}$.

Задача состоит в том, чтобы оценить параметры k и B , при которых оба этих множества значений были бы близки к значениям $\{\overline{Q^*(\rho_n)}\}_{n=1,\dots,N}$ и $\{DQ^*(\rho_n)\}_{n=1,\dots,N}$ для очереди в данной СМО, полученной при подаче на вход достаточно длинной трассы реального трафика.

Аналитических выражений для этих величин в СМО с таким входным потоком не существует, поэтому для оценки параметров будем использовать нейросеть.

Описание используемой нейросети

Для демонстрации возможности такого подхода обучим достаточно простую нейросеть (рисунок 1), где приведено стандартное графическое представление нейросети, генерируемое библиотекой Keras языка Python, использовавшейся в данной работе. Для эксперимента возьмем 9 значений ρ , минимальное – 0,1, максимальное – 0,9, и, учитывая, что, таким образом, входных значений у нейронной сети получится 18 (9 математических ожиданий и 9 дисперсий), обозначим их как $\{x_n\}_{n=0,\dots,17}$ согласно принятой в области нейросетей традиции нумерации с нуля. При этом

$$\begin{cases} x_n = \frac{\overline{Q(\rho_{n+1})} - C_{n+1}}{S_{n+1}}, n = 0, \dots, 8; \\ x_n = \frac{DQ(\rho_{n-8}) - C_{n+1}}{S_{n+1}}, n = 9, \dots, 17. \end{cases},$$

где $\{\rho_n\}_{n=1,\dots,9}$, а $\{C_n\}_{n=1,\dots,18}$ и $\{S_n\}_{n=1,\dots,8}$ – центрирующие и нормирующие по соответствующему входу величины, вычисляемые по множеству обучающих примеров объемом M по следующим формулам:

$$\begin{cases} \tilde{N}_n = \frac{1}{M} \sum_{i=0}^{M-1} x_{n-1,i}, & n = 1, \dots, 18; \\ x_n = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=0}^{M-1} x_{n-1,i}^2 - C_n^2}, & n = 1, \dots, 18. \end{cases},$$

где $x_{n,i}$ – значение на входе n обучающего примера i . Такая нормировка производится для того, чтобы на всех входах данные лежали примерно в одинаковом диапазоне, что повышает качество работы нейросети.

После входа идут два полносвязанных слоя нейросети, в каждом из которых по 16 нейронов, у каждого на выходе функция активации *Relu*, а далее – два выходных нейрона – один оценивает параметр k гамма-потока, а второй – размер пачки B . У выходных нейронов функция активации отсутствует. Это одна из типичных архитектур нейросети для решения задачи регрессии параметров входных данных.

В качестве функции потерь, минимизируемой при обучении нейросети, использовалось среднеквадратическое отклонение.

Для повышения точности важным является вопрос выбора значений $\{\rho_n\}_{n=1,\dots,9}$. Равномерный шаг по ρ от 0,1 до 0,9 не является оптимальным решением, так как входные данные приближаются с одинаковой относительной погрешностью, что при больших ρ , приводит к большой абсолютной погрешности приближения $\{\overline{Q(\rho_n)}\}$ и $\{DQ(\rho_n)\}$, $n = 1, \dots, N$.

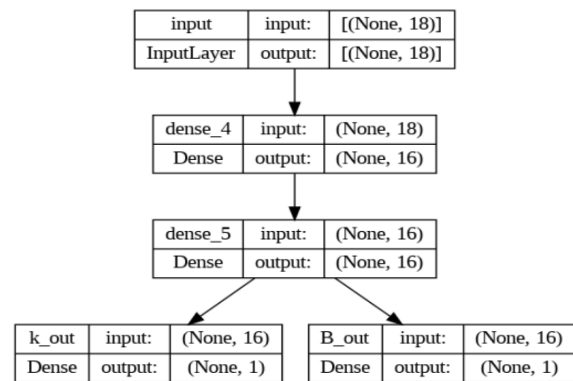


Рисунок 1. Архитектура нейронной сети

Заметно большую точность дает разделение интервала $[0,1; 0,9]$ на 8 интервалов так, чтобы для самой быстрорастущей зависимости $\overline{Q(\rho_n)}$ из рассматриваемого семейства, для каждого интервала $[\rho_n, \rho_{n+1})$ выполнялось условие:

$$(\rho_{n+1} - \rho_n)(\overline{Q(\rho_{n+1})} - \overline{Q(\rho_n)}) = \text{const} \quad \forall_n = 1, \dots, 8.$$

Определить нужные величины ρ можно численно, приняв $\rho_1=0,1$, $\rho_9=0,9$, и подобрав сначала такое значение ρ_5 , что $(\rho_5 - \rho_1)(\overline{Q(\rho_5)} - \overline{Q(\rho_1)}) = (\rho_9 - \rho_5)(\overline{Q(\rho_9)} - \overline{Q(\rho_5)})$, а потом аналогичным образом найти ρ_3 , используя известные ρ_1 и ρ_5 , ρ_7 и известные ρ_5 и ρ_9 и т. д.

Для обучающей и контрольной выборки методом имитационного моделирования было сгенерировано 3000 трасс гамма-потоков со случайными параметрами, длина каждой трассы 200000. 2500 трасс составляли обучающую выборку, 500 трасс – контрольную. Для каждой трассы были посчитаны величины $\{\overline{Q(\rho_n)}\}_{n=1, \dots, N}$ и $\{DQ(\rho_n)\}_{n=1, \dots, N}$, подаваемые на вход нейросети. Соответствующие каждой трассе параметры использовались для обучения с учителем и для тестового контроля.

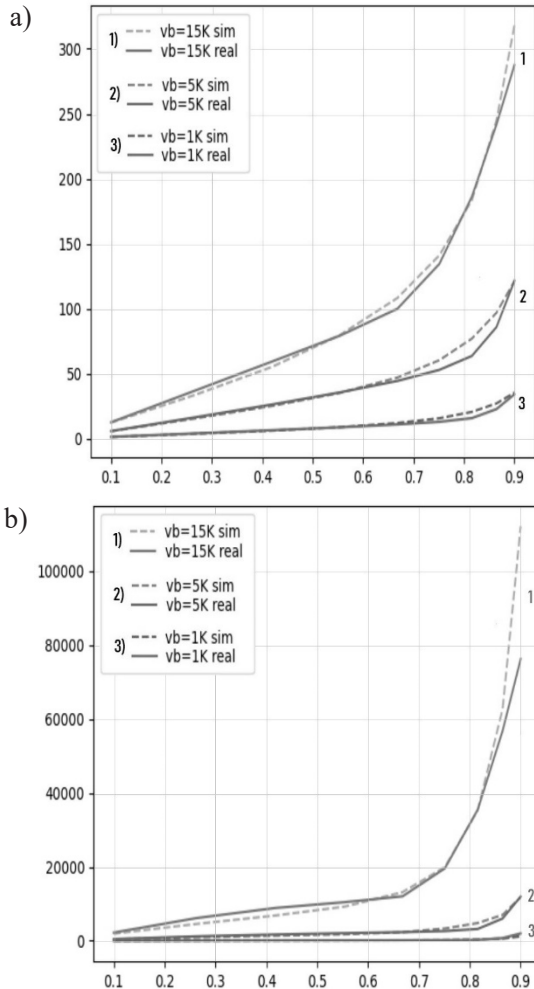


Рисунок 2. Результаты для приближения гамма-потоков с использованием нейросети: а) Средняя очередь пакетов в потоке; б) Дисперсия очереди пакетов в потоке

Именно генерация методом имитационного моделирования всех примеров занимает более 99% времени проведения такого эксперимента.

Оценка с применением аналитических выражений для сравнения

Для того, чтобы сравнить качество полученных результатов, попробуем приблизить статистические характеристики очереди реального трафика с помощью групповых пуассоновских потоков, для которых мы можем использовать обобщение формул Поллачека-Хинчина, полученных в [3] для СМО G/D/1 интервальным методом. Приведем их здесь в упрощенном виде для постоянного размера пачки B .

$$\overline{Q}(\rho) = \frac{\rho B}{2(1-\rho)} - \frac{\rho}{2}. \quad (1)$$

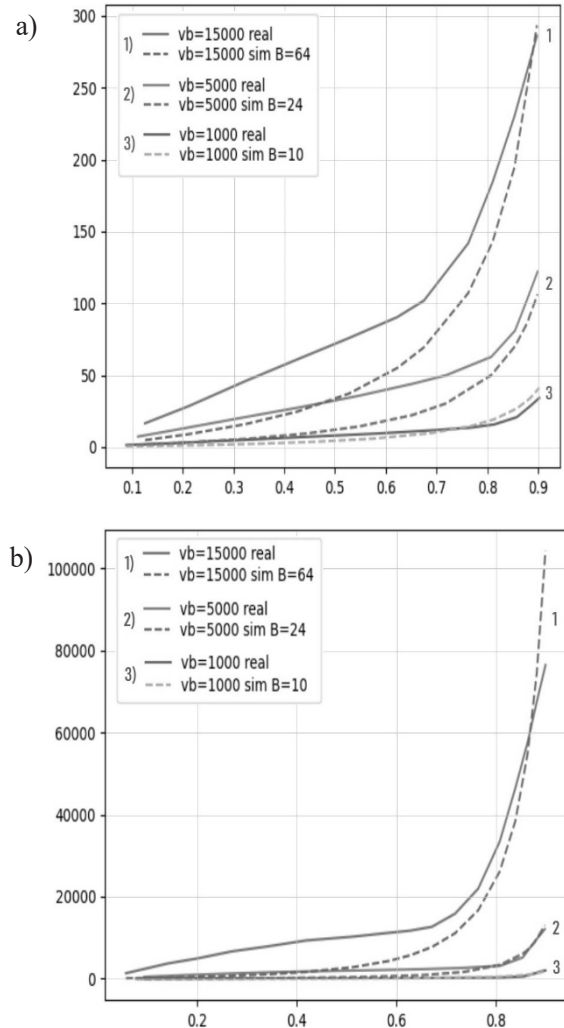


Рисунок 3. Результаты для приближения пуассоновским потоком: а) Средняя очередь пакетов в потоке; б) Дисперсия очереди пакетов в потоке

$$DQ(\rho) = \frac{\rho B - \rho(1-\rho)}{4(1-\rho)^2} (\rho B + \rho^2 - 3\rho + 2) + \frac{\rho^3 + \rho B^2 + 3\rho^2 B - 3\rho B - 3\rho^2 + 2\rho}{3(1-\rho)}, \quad (2)$$

где $\rho = \lambda \tau B$, λ – интенсивность потока, τ – постоянное время обслуживания одной заявки.

Имея значения статистических характеристик очереди реального трафика $\{Q^*(\rho_n)\}_{n=1,...,N}$ и $\{DQ^*(\rho_n)\}_{n=1,...,N}$, мы можем методом наименьших квадратов минимизировать по параметру B отклонение аналитических кривых (1), (2) от реальных значений при соответствующих нагрузках, и это даст нам приближение реального трафика групповым пуассоновским потоком в смысле порождаемой очереди. Заметим, что в описанных ниже экспериментах мы использовали метод наименьших взвешенных квадратов с весами, обратно пропорциональными значениям соответствующих $\{Q^*(\rho_n)\}_{n=1,...,N}$ и $\{DQ^*(\rho_n)\}_{n=1,...,N}$, так как они сильно различаются по величине. То есть, по параметру B минимизировалась следующая величина:

$$J = \sum_{n=1}^N \left(\frac{(\overline{Q^*(\rho_n)} - Q^*(\rho_n))^2}{Q^*(\rho_n)} \right) + \frac{(DQ^*(\rho_n) - DQ(\rho_n))^2}{DQ^*(\rho_n)},$$

где $\overline{Q^*(\rho_n)}$ и $DQ^*(\rho_n)$ – константы, найденные в результате имитационного моделирования очереди реального трафика, а $Q^*(\rho_n)$ и $DQ^*(\rho_n)$ вычисляются по формулам (1, 2).

Заключение

Эксперименты проводились на трассах видеотрафика стандарта H264 с различными значениями параметра кодирования (размером видеобуфера). Результаты, представленные на рисунках 2 и 3, с очевидностью демонстрируют большее приближение при использовании гамма-потоков, параметры которых оцениваются с помощью нейросети.

Это иллюстрирует практическую полезность данного подхода, и перспективы использования нейросетей для решения практических задач, где применяется теория очередей. Кроме собственно имитационного моделирования, в качестве примера возможного применения такого подхода можно предложить, например, обучать нейросеть оценивать в реальном времени вероятность переполнения буфера в телекоммуникационном узле при большой нагрузке. Если использовать при обучении реальный трафик, то его нужно очень много, так как переполнение буфера в реальном оборудовании связи при штатной работе – это довольно редкое событие. Если же использовать искусственно генерируемый трафик, параметры которого, которые также определены с помощью нейросети, позволяют получать близкие к реальным очереди, то его легко можно произвести в необходимом для т.н. предобучения нейросети количестве, а дообучить ее, в случае необходимости, на реальном трафике.

Литература

1. Лихтциндер Б.Я., Моисеев В.И., Привалов А.Ю.

- О возможности использования групповых пуассоновских потоков в имитационном моделировании // Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ-2024): материалы X Международной конференции. Самара: Самарский университет, 2024. С. 8–11.
2. Vishnevsky V., Gorbunova A.V. Application of machine learning methods to solving problems of queuing theory // Information Technologies and Mathematical Modelling. Queueing Theory and Applications. 2022. Vol. 1605. P. 304–316. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-09331-9_24
3. Likhhtsinder B.J., Privalov A.Y., Moiseev V.I. Batch poissonian arrival models of multiservice network traffic // Problems of Information Transmission. 2023. Vol. 59, no. 1. P. 63–70. DOI: 10.1134/S0032946023010064
4. Лихтциндер Б.Я., Моисеев В.И. Групповые пуассоновские и гиперпуассоновские модели пакетного трафика // I-methods. 2022. Т. 14, № 3. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_49871213_30704781.pdf (дата обращения: 26.04.2024).
5. Likhhtsinder B.Ya., BakaiYu.O. Models of group poisson flows in telecommunication traffic control // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2020. Т. 28, № 3 (67). С. 75–89.
6. Лихтциндер Б.Я. Интервальные характеристики групповых пуассоновских моделей трафика телекоммуникационных систем // Инфокоммуникационные технологии. 2020. Т. 18, № 3. С. 302–311.
7. Лихтциндер Б.Я. Трафик мультисервисных сетей доступа (интервальный анализ и проектирование). М.: Горячая линия - Телеком, 2018. 290 с.
8. Блатов И.А., Лихтциндер Б.Я. О предельных значениях длин очередей в СМО с пачечными потоками // Инфокоммуникационные технологии. 2018. Т. 16, № 2. С. 181–187.
9. Привалов А.Ю., Лихтциндер Б.Я. Интервальный анализ трафика многоканальных систем массового обслуживания // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2023. Т. 31, № 2. С. 56–69.
10. Лихтциндер Б.Я. Особенности многоканальной обработки пачечного трафика // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2017. Т. 11, № 11. С. 30–33.

Получено 08.05.2024

Лихтциндер Борис Яковлевич, д.т.н., профессор, профессор кафедры сетей и систем связи Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ). 443010, Российская Федерация, г. Самара, ул. Л. Толстого, 23. Тел. +7 846 333-47-69. E-mail: lixt@psuti.ru

Привалов Александр Юрьевич, д.т.н., заведующий кафедры прикладной математики и физики Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева. 443086, Российская Федерация, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34. Тел. +7 846 332-56-07. E-mail: privalov.ayu@ssau.ru

Максимова Татьяна Дмитриевна, помощник проректора по административно-хозяйственной работе ПГУТИ. 443010, Российская Федерация, г. Самара, ул. Л. Толстого, 23. Тел. +7 846 339-11-33 (доб. 108). E-mail: td.pavlova@psuti.ru

GROUP GAMMA-DISTRIBUTION AND NEURAL NETWORK IN OF THE LATEST TELECOMMUNICATION TRAFFIC MODELING

Likhttsinder B.Ya.¹, Privalov A.Yu.², Maksimova T.D.¹

¹ *Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russian Federation*

² *Samara National Research University, Samara, Russian Federation*

E-mail: lixt@psuti.ru, td.pavlova@psuti.ru, privalov.ayu@ssau.ru

This article considers queue formation in the M/D/1 system with statistical characteristics of the first two orders that are close to real, as the purpose of telecommunication traffic modeling. The input stream to the system is considered to be a group stream with constant parameters of the package and distance between arrivals, influenced by gamma distribution. These parameters are determined by a neural network trained to determine parameters of such input streams according to statistical characteristics of the queue at various loads of device. The results obtained demonstrate a good approximation with the use of gamma-ray fluxes. Parameters are evaluated with the use of the neural network. The practical usefulness of the considered approach and the prospects of using neural networks for practical tasks in solving which queue theory is used are provided.

Keywords: *queuing system, not ordinary entrance stream, queue moments, neural network, gamma distribution*

DOI: 10.18469/ikt.2023.21.4.04

Likhttsinder Boris Yakovlevich, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 23, L. Tolstoy Street, Samara, 443010, Russian Federation; Professor of Networks and Communication Systems Department, Doctor of Technical Science, Professor. Tel. +7 846 333-47-69. E-mail: lixt@psuti.ru

Privalov Alexander Yurievich, Samara National Research University, 34, Moskovskoe shosse, Samara, 443086, Russian Federation; Head of Applied Mathematics and Physics Department, Doctor of Technical Science, Professor. Tel. +7 846 332-56-07. E-mail: privalov.ayu@ssau.ru

Maksimova Tatiana Dmitrievna, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 23, L. Tolstoy Street, Samara, 443010, Russian Federation; Assistant to the vice-rector for administrative and economic work. Tel. +7 846 339-11-33 (ext. 108). E-mail: td.pavlova@psuti.ru

References

1. Lichtzinder B.Ya., Moiseev V.I., Privalov A.Yu. On the possibility of using group Poisson flows in simulation modeling. *Informacionnye tekhnologii i nanotekhnologii (ITNT-2024): materialy X Mezhdunarodnoj konferencii*. Samara: Samarskiy universitet, 2024, pp. 8–11. (In Russ.)
2. Vishnevsky V., Gorbunova A.V. Application of machine learning methods to solving problems of queuing theory. *Information Technologies and Mathematical Modelling. Queueing Theory and Applications*, 2022, vol. 1605, pp. 304–316. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-09331-9_24
3. Likhttsinder B.J., Privalov A.Y., Moiseev V.I. Batch poissonian arrival models of multiservice

- network traffic. *Problems of Information Transmission*, 2023, vol. 59, no. 1, pp. 63–70. DOI: 10.1134/S0032946023010064
4. Lichtzinder B.Ya., Moiseev V.I. Group Poisson and Hyperpoisson models of packet traffic. *I-methods*, 2022, vol. 14, no. 3. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_49871213_30704781.pdf (accessed: 26.04.2024). (In Russ.)
 5. Likhttsinder B.Ya., Bakai Yu.O. Models of group poisson flows in telecommunication traffic control. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki*, 2020, vol. 28, № 3 (67), pp. 75–89.
 6. Likhttsinder B.Ya. Interval characteristics of group poisson models of telecommunication systems traffic. *Infokommunikacionnye tehnologii*, 2020, vol. 18, no. 3, pp. 302–311. (In Russ.)
 7. Likhttsinder B.Ya. *Traffic of multiservice access networks (interval analysis and design)*. Moscow: Goryachaya liniya - Telekom, 2018, 290 p. (In Russ.)
 8. Blatov I.A., Likhttsinder B.Ya. About limit values queue lengths in queuing systems with burst flows. *Infokommunikacionnye tehnologii*, 2018, vol. 16, no. 2, pp. 181–187. (In Russ.)
 9. Privalov A.Y., Likhttsinder B.Ya. Interval traffic analysis of multichannel queuing systems. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki*, 2023, vol. 31, no. 2, pp. 56–69. (In Russ.)
 10. Likhttsinder B.Ya. Features of multi-channel processing of batch traffic. *T-Comm: Telekommunikacii i transport*, 2017, vol. 11, no. 11, pp. 30–33. (In Russ.)

Received 08.05.2024

ЛИНИИ СВЯЗИ И ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

УДК 621.39

ОПТИМИЗАЦИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ МОД ДЛЯ ИЗЛУЧАТЕЛЯ ОПТИЧЕСКИХ ВИХРЕВЫХ ПУЧКОВ НА ОСНОВЕ МИКРОКОЛЬЦЕВОГО РЕЗОНАТОРА

Бакирова Л.И., Воронков Г.С., Любопытнов В.С., Степанов И.В., Кутдуйров Р.В.,

Грахова Е.П., Багманов В.Х.

Уфимский университет науки и технологий, Уфа, РФ

E-mail: bakirova.li@ugatu.su

Световые пучки с орбитальным угловым моментом, обладают уникальными свойствами, которые делают их ценными для исследований и практического применения. От революции в технологиях связи до передовой микроскопии и возможностей квантовых вычислений – эти лучи продолжают стимулировать инновации и открывать новые горизонты в оптике и фотонике. В данной работе исследуется зависимость мощности потока излучения оптического вихревого пучка от геометрии излучающей структуры. В качестве излучателя оптического вихревого пучка используется микрокольцевой резонатор с периодической структурой. В нашем исследовании оптимизация ширины кольцевого волновода приводит к увеличению мощности потока излучения до 30% для резонансной длины волны 1563 нм. Чтобы проанализировать, как моды шепчущей галереи распределяются в поперечном сечении кольцевого волновода, мы увеличили ширину последнего с 400 нм до 500 нм. Предложенный подход может быть применен к излучающим микрокольцевым резонаторам в различных приложениях.

Ключевые слова: оптический вихревой пучок, микрокольцевой резонатор, моды шепчущей галереи, орбитальный угловой момент, фотонная интегральная схема

Введение

Микрокольцевые резонаторы (МКР) являются одним из наиболее важных и незаменимых элементов при разработке фотонных интегральных схем (ФИС) [1]. Они имеют ряд преимуществ по сравнению с другими устройствами, таких как высокая

добротность, малая занимаемая площадь, высокая эффективность и гибкость манипулирования светом, а также возможность использования в сенсорных системах [2–4]. МКР может быть использован в качестве биосенсоров для медицинской диагностики, электрооптических модуляторов, для применения в нелинейной и квантовой фотонике и

т.д. [5]. Более того, МКР нашел свое применение и в области генерации структурированных лучей. В частности, это относительно простая и эффективная структура для излучения и детектирования световых пучков, несущих орбитальный угловой момент (ОУМ), и также называемых оптически-вихревыми пучками [6; 7]. Такие МКР, специально разработанные для работы с ФИС вне плоскости, способны генерировать вихревые пучки над устройством в свободном пространстве (out-of-plane) [8]. Кроме того, МКР на основе ФИС, благодаря своей компактности, могут заменить традиционные спиральные фазовые пластины и пространственные модуляторы света при генерации ОУМ в маломодовых волокнах [9].

Излучающий МКР представляет собой кольцевой волновод с элементами решетки для излучения вихревого пучка. В одном из фундаментальных исследований был предложен компактный интегральный излучатель ОУМ на основе МКР с угловыми решетками [10]. Полное внутреннее отражение света в кольцевом волноводе МКР вызывает появление мод шепчущей галереи (МШГ), что приводит к излучению вихревого пучка [11]. МШГ – это тип волн, которые могут распространяться вдоль искривленных поверхностей [12]. В работе [10], авторы используют угловую решетку, нанесенную на внутреннюю поверхность кольца, для направления вихревых пучков в свободное пространство. Световая волна рассеивается элементами решетки, и энергия частично отклоняется в направлении, где наблюдается конструктивная интерференция. Поскольку волновод изогнут в форме круга и поддерживает МШГ, то, согласно принципу Гюйгенса, волновой фронт излучаемого света должен отклоняться в азимутальном направлении ϕ и представлять собой спираль. Именно поэтому, такой пучок будет переносить ОУМ.

Преимущества использования МКР для излучения вихревых пучков были показаны во многих исследованиях [10; 13; 14]. МКР компактны и просты в изготовлении, в частности, на кремниевых фотонных платформах, что обеспечивает простое и экономически эффективное решение для интегрированных оптических систем [15]. Однако, при распространении вихревого пучка в свободном пространстве важно получить минимально возможный угол расходимости [16] и максимальную мощность потока излучения. В данной работе предлагается рассмотреть эффективность излучения МКР, предназначенного для генерации оптических вихревых пучков.

Оптимизация и моделирование излучателя

В нашей предыдущей работе [17] мы предложили алгоритм оптимизации излучающего МКР на основе условия критической связи. Ширина кольцевого волновода в этом случае была равна $\lambda/2$. Такие резонаторы на основе кольцевого волновода способны пропускать свет с определенным порядком ОУМ. Однако, для обеспечения эффективного удержания света и контроля излучения необходимо тщательно продумать ширину волновода. Увеличивая ширину кольцевого волновода, можно настроить моды резонатора таким образом, чтобы они оставались в пределах волновода и при этом обеспечивали контролируемое излучение [18]. На рисунках 1, 2 показано поперечное сечение кольцевого волновода при различной ширине от 400 нм до 500 нм. Моделирование проводилось в программе Ansys Lumerical MODE, которая позволяет анализировать направляющие структуры. Можно заметить, что при ширине кольцевого волновода 400 нм МШГ выходят с боковых сторон кольца, а при увеличении ширины до 500 нм достигается минимизация потерь.

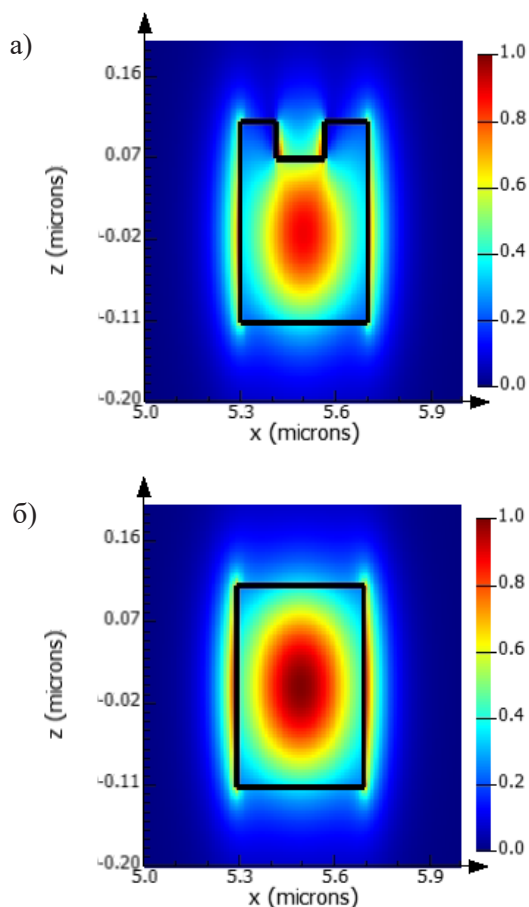


Рисунок 1. Распределение мощности в кольцевом волноводе шириной 400 нм: а) в центре отверстия; б) между отверстиями.

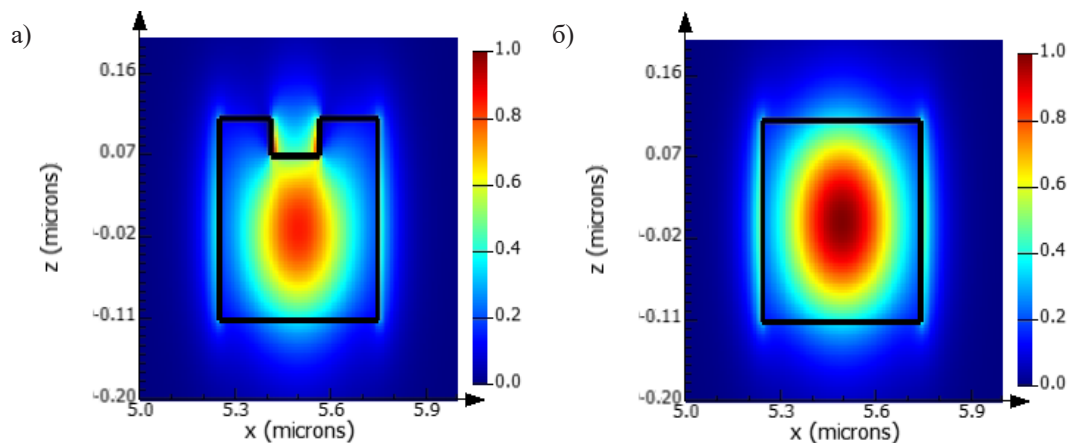


Рисунок 2. Распределение мощности в кольцевом волноводе шириной 500 нм:
а) в центре отверстия; б) между отверстиями.

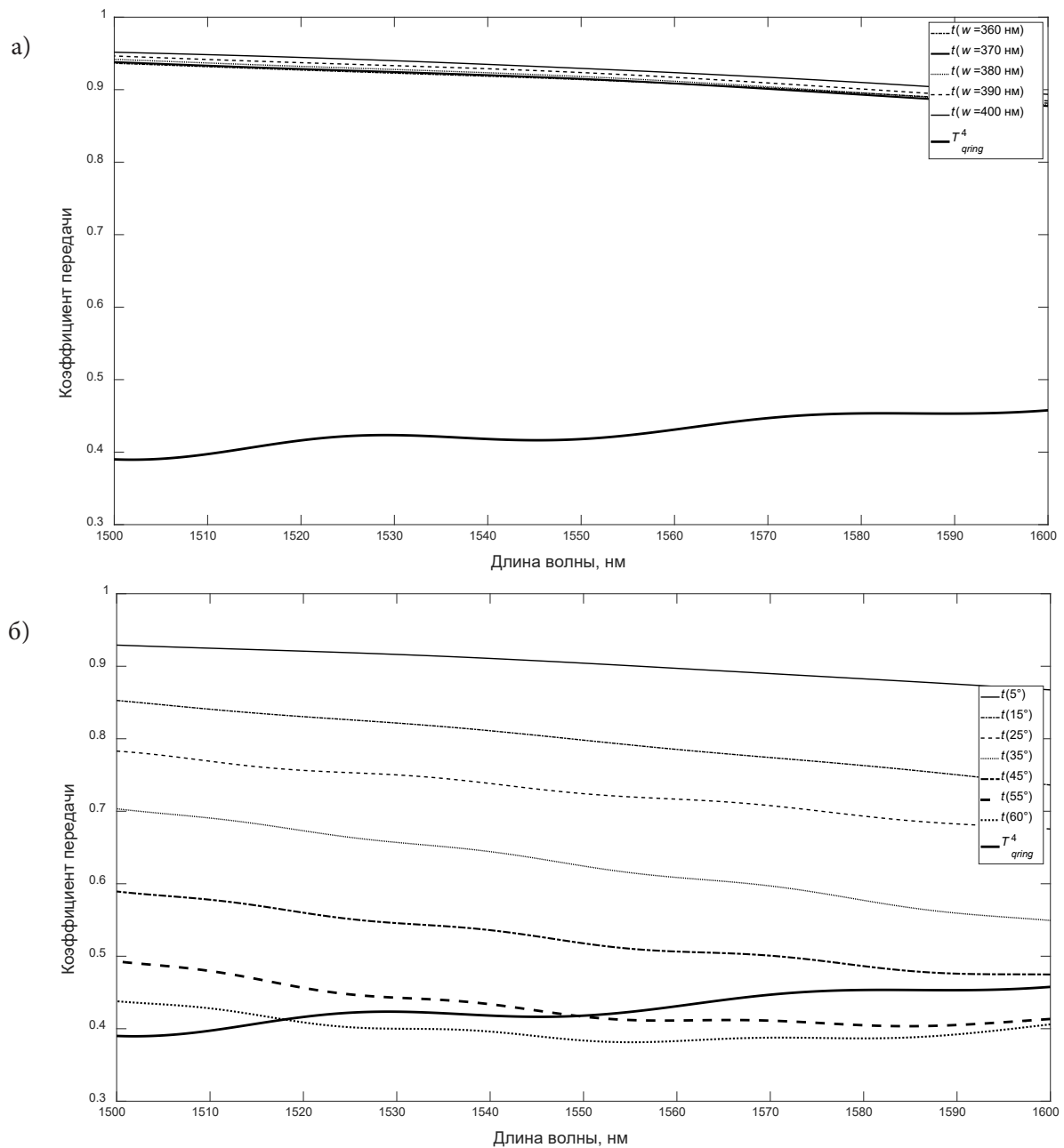


Рисунок 3. Изменение коэффициента передачи для МКР_2 в зависимости от: а) ширины подводящего волновода; б) угла изгиба подводящего волновода.

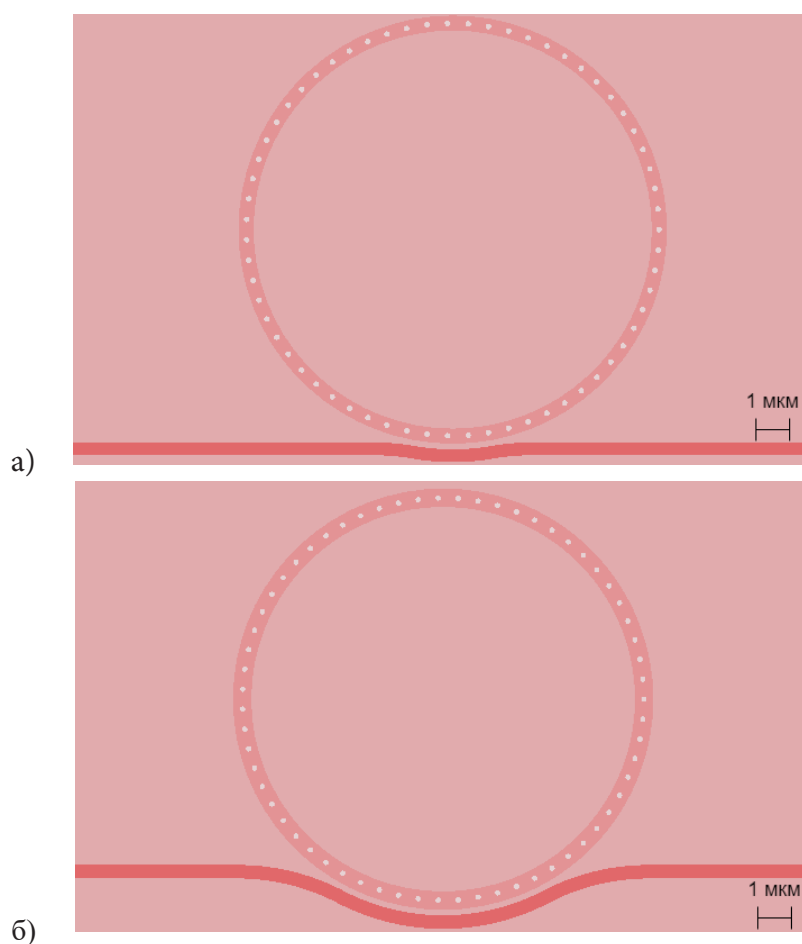


Рисунок 4. Вид сверху: а) МКР_1; б) МКР_2

В работе [17], мы оптимизировали параметры излучающего МКР с шириной кольцевого волновода 400 нм следующим образом: ширина подводящего волновода $w_{feed_wvg} = 340$ нм, угол изгиба подводящего волновода в схеме «pulley-coupling» $\theta = 20^\circ$ [19] (обозначим его МКР_1). Далее, используя тот же алгоритм, мы оптимизировали МКР_2 при ширине кольцевого волновода 500 нм. Для определения величины потерь во всем кольцевом волноводе A_{ring} была использована методика, описанная в работе [4]. Чтобы определить амплитудный коэффициент передачи кольцевого волновода T_{ring} мы моделируем $1/4$ часть кольца T_{qring} , а затем полученное значение возводим в четвертую степень.

Таким образом, условие критической связи для излучателя ОУМ может быть выражено как:

$$t = T_{qring}^4$$

где t – амплитудный коэффициент передачи на сквозном порту направленного ответвителя МКР.

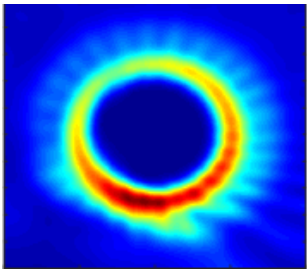
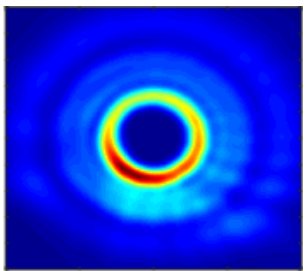
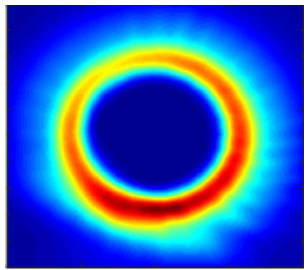
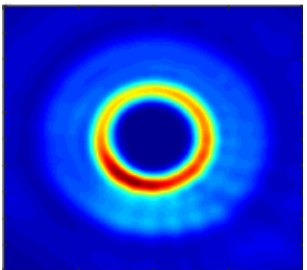
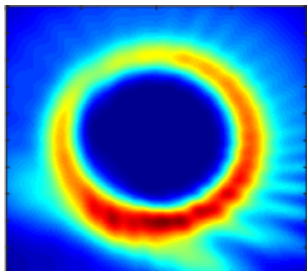
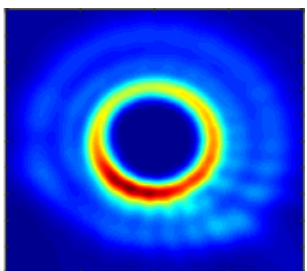
Мы получили следующие оптимизированные геометрические параметры для МКР_2, (рисунок 3): ширина подводящего волновода $w_{feed_wvg} = 370$ нм, угол изгиба подводящего волновода $\theta = 55^\circ$. Зазор

между кольцевым и подводящим волноводами был выбран $gap = 150$ нм (дальнейшее уменьшение зазора было бы сопряжено с технологическими сложностями при его изготовлении). Остальные параметры приведены в таблице 1, а вид сверху МКР_1 и МКР_2 показан на рисунке 4.

Таблица 1. Параметры МКР_1 и МКР_2

Наименование параметра	Значение	
	МКР_1	МКР_2
Ширина подводящего волновода	340 нм	370 нм
Угол подводящего волновода	20°	55°
Ширина кольцевого волновода	400 нм	500 нм
Радиус кольца (средний)	5,5 мкм	
Количество отверстий	63	
Глубина отверстий	70 нм	
Диаметр отверстий	150 нм	
Высота кольцевого волновода (Si)	220 нм	
Толщина SiO ₂	5 мкм	
Толщина подложки (Si)	2 мкм	

Таблица 2. Распределение интенсивности в зависимости от ширины кольцевого волновода

1) Длина волны, нм 2) Мощность потока излучения (а.е.) 3) Порядок ОУМ	Распределение интенсивности на расстоянии 5 мкм (МКР_1)	1) Длина волны, нм 2) Мощность потока излучения (а.е.) 3) Порядок ОУМ	Распределение интенсивности на расстоянии 5 мкм (МКР_2)
1529,64 33,06 13		1529,25 40,43 8	
1545,99 33,78 14		1546,39 38,903 9	
1562,7 25,11 15		1563,93 36,919 10	

Мы рассчитали мощность потока излучения для различных резонансных длин волн в оптимизированном МКР с помощью метода конечных разностей во времени (Finite Difference Time Domain, FDTD) в программе Ansys Lumerical 2020 R2.4. Результаты представлены в таблице 2.

Видно, что при ширине кольцевого волновода 400 нм пучок, переносящий ОУМ, расходится очень быстро. При ширине кольцевого волновода 500 нм мы уменьшили выход энергии с боковых сторон кольцевого волновода, направив луч вертикально вверх. В работе [20] авторы предлагают интегрировать металлические зеркала под кремниевую пленку для повышения эффективности оптической мощности. Чтобы минимизировать угол расхождения и повысить эффективность излучения оптического вихревого пучка, в исследовании используется отражающий элемент. Он отражает распространяющиеся компоненты, излучаемые на подложку, обратно в воздух. Отраженный луч далее интерферирует с исходным лучом, формируя вихревой пучок с высокой эффективностью. В нашей работе мы рассмотрели возможность увеличения

мощности потока излучения и уменьшения угла расходимости за счет оптимизации геометрических параметров кольца.

Заключение

Мы исследовали влияние ширины кольцевого волновода на распространение мод шепчущей галереи, что, в свою очередь, влияет на мощность выходного излучения пучка. Результаты показали, что такой подход приводит к значительному увеличению мощности потока излучения, причем в ближней зоне до 30%. При этом ширина кольцевого волновода была изменена с 400 нм до 500 нм, чтобы повлиять на распределение мод шепчущей галереи в поперечном сечении волновода. Это демонстрирует потенциал предложенного метода для эффективного управления плотностью потока мощности. Такие результаты свидетельствуют о том, что метод может быть полезен в приложениях, требующих точного контроля и увеличения плотности потока мощности, например, при освещении и высокоточном зондировании с использованием микрополостей с модами шепчущей галереи.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках работ по государственному заданию Минобрнауки России для Уфимского университета науки и технологий (соглашение № 075-03-2024-123/1 от 15.02.2024 г.) в молодежной научно-исследовательской лаборатории Евразийского научно-образовательного центра «Сенсорные системы на основе устройств интегральной фотоники».

Литература

1. Silicon photonic microring resonators: a comprehensive design-space exploration and optimization under fabrication-process variations / A. Mirza [et al.] // IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems. 2022. Vol. 41, no. 10. P. 3359–3372.
2. Silicon photonic micro-ring resonators for chemical and biological sensing: a tutorial / P. Steglich [et al.] // IEEE Sensors Journal. 2022. Vol. 22, no. 11. P. 10089–10105.
3. Fallahi V., Kordrostami Z., Hosseini M. Sensitivity and quality factor improvement of photonic crystal sensors by geometrical optimization of waveguides and micro-ring resonators combination // Scientific Reports. 2024. Vol. 14, no. 1. P. 2001.
4. Design and modeling of a fully integrated microring-based photonic sensing system for liquid refractometry / G. Voronkov [et al.] // Sensors. 2022. Vol. 22, no. 23. P. 9553.
5. Bawankar Y.R., Singh A. Microring resonators based applications in silicon photonics – a review // 5th Conference on Information and Communication Technology (CICT). India, Kurnool, 2021. P. 1–6.
6. Design and modeling of a photonic integrated device for optical vortex generation in a silicon waveguide / R.V. Kutluyarov [et al.] // Computer optics. 2021. Vol. 45, no. 3. P. 324–330.
7. Recent advances in generation and detection of orbital angular momentum optical beams – a review / D.M. Fatkhiev [et al.] // Sensors. 2021. Vol. 21, no. 15. P. 4988.
8. Wavelength-tunable vortex beam emitter based on silicon micro-ring with PN depletion diode / I.V. Stepanov [et al.] // Sensors. 2022. Vol. 22, no. 3. P. 929.
9. Method for determination of the principal modes in a few-mode optical fiber using a multibranch DOE / V.S. Lyubopytov [et al.] // Computer Optics. 2014. Vol. 38, no. 4. P. 727–736.
10. Integrated compact optical vortex beam emitters / X. Cai [et al.] // Science. 2012. Vol. 338, no. 6105. P. 363–366.
11. Whispering gallery mode optical microresonators: structures and sensing applications / L. Cai [et al.] // Physica Status Solidi (A) Applications and Materials. 2020. Vol. 217, no. 6. P. 1900825.
12. Lu X., McClung A., Srinivasan K. High-Q slow light and its localization in a photonic crystal microring // Nature Photonics. 2022. Vol. 16, no. 1. P. 66–71.
13. An InP-based vortex beam emitter with monolithically integrated laser / J. Zhang [et al.] // Nature Communications. 2018. Vol. 9, no 1. P. 2652.
14. Radially polarized orbital angular momentum beam emitter based on shallow-ridge silicon microring cavity / R. Li [et al.] // IEEE Photonics Journal. 2014. Vol. 6, no. 3. P. 1–10.
15. Jian Y.-H., Chow C.-W. Design and analysis of a compact micro-ring resonator signal emitter to reduce the uniformity-induced phase distortion and crosstalk in orbital angular momentum (OAM) division multiplexing // Optics Express. 2023. Vol. 31, no. 2. P. 810.
16. Generation of E-band metasurface-based vortex beam with reduced divergence angle / H. Chung [et al.] // Scientific Reports. 2020. Vol. 10, no. 1. P. 8289.
17. Micro-ring resonator-based tunable vortex beam emitter / L.I. Bakirova [et al.] // Micromachines. 2023. Vol. 15, no. 1. P. 34.
18. Acharyya N., Kozyreff G. Large Q factor with very small whispering-gallery-mode resonators // Physical Review Applied. 2019. Vol. 12, no. 1. P. 014060.
19. Orbital angular momentum vector modes (de) multiplexer based on multimode micro-ring / S. Li [et al.] // Optics Express. 2018. Vol. 26, no. 23. P. 29895.
20. Compact high-efficiency vortex beam emitter based on a silicon photonics micro-ring / S. Li [et al.] // Optics Letters. 2018. Vol. 43, no. 6. P. 1319.

Получено 29.03.2024

Бакирова Ляйсан Ильшатовна, младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории (НИЛ) «Сенсорные системы на основе устройств интегральной фотоники» Уфимского университета науки и технологий (УУНиТ). 450077, Российская Федерация, г. Уфа, ул. Карла Маркса, 12/6. Тел. +7 919 146-96-48. E-mail: bakirova.li@ugatu.su

Воронков Григорий Сергеевич, к.т.н., доцент, доцент кафедры телекоммуникационных систем (ТС), старший научный сотрудник НИЛ «Сенсорные системы на основе устройств интегральной фотоники» УУНиТ. 450077, Российская Федерация, г. Уфа, ул. Карла Маркса, 12/6. Тел. +7 927 942-00-02. E-mail: voronkov.gs@ugatu.su

Любобытов Владимир Сергеевич, к.т.н., старший научный сотрудник НИЛ «Сенсорные системы на основе устройств интегральной фотоники» УУНиТ. 450077, Российская Федерация, г. Уфа, ул. Карла Маркса, 12/6. Тел. +7 927 944-88-99. E-mail: lyubopytov.vs@ugatu.su

Степанов Иван Васильевич, инженер-исследователь НИЛ «Сенсорные системы на основе устройств интегральной фотоники» УУНиТ. 450077, Российская Федерация, г. Уфа, ул. Карла Маркса, 12/6. Тел. +7 927 335-56-19. E-mail: stepanov.iv@ugatu.su

Кутлuyarov Руслан Владимирович, к.т.н., доцент кафедры ТС, старший научный сотрудник НИЛ «Сенсорные системы на основе устройств интегральной фотоники» УУНиТ. 450077, Российская Федерация, г. Уфа, ул. Карла Маркса, 12/6. Тел. +7 927 967-00-06. E-mail: kutluyarov.rv@ugatu.su

Грахова Елизавета Павловна, к.т.н., доцент кафедры ТС, заведующая НИЛ «Сенсорные системы на основе устройств интегральной фотоники» УУНиТ. 450077, Российская Федерация, г. Уфа, ул. Карла Маркса, 12/6. Тел. +7 917 352-23-53. E-mail: grakhova.ep@ugatu.su

Багманов Валерий Хусаинович, д.т.н., профессор кафедры ТС УУНиТ. 450077, Российская Федерация, г. Уфа, ул. Карла Маркса, 12/6. Тел. +7 903-352-71-90. E-mail: bagmanov.v@rambler.ru

OPTIMIZATION OF MODE PROPAGATION FOR AN EMBEDDED OF OPTICAL VORTEX BEAMS BASED ON A MICRO-RING RESONATOR

*Bakirova L.I., Voronkov G.S., Lyubopytov V.S., Stepanov I.V., Kutluyarov R.V.,
Grakhova E.P., Bagmanov V. Kh.
Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russian Federation
E-mail: bakirova.li@ugatu.su*

Light beams with orbital angular momentum have unique properties that make them valuable for research and practical applications. From revolutionizing communication technologies to enabling advanced microscopy and quantum computing possibilities, these beams continue to drive innovation and open up new frontiers in optics and photonics. In this paper, the dependence of the radiation flux density of an optical vortex beam on the geometry of the emitting structure is investigated. A micro-ring resonator with periodic structures is used as an optical vortex beam emitter structure. In our study, optimizing the width of the ring waveguide leads to an increase in the radiation flux power up to 30% for the resonant wavelength of 1563 nm. To analyze how the whispering gallery modes are distributed in the cross section of the annular waveguide, we increased the annular waveguide width from 400 nm to 500 nm. This proposed approach can be applied to radiating micro-ring resonators in various applications.

Keywords: *optical vortex beam, micro-ring resonator, whispering gallery mode, orbital angular momentum, photonic integrated circuit*

DOI: 10.18469/ikt.2023.21.4.05

Bakirova Liaisan Ilshatovna, Ufa University of Science and Technology, 12/6, Karl Marx Street, Ufa, 450077, Russian Federation; Junior Researcher of the Research Laboratory «Sensor Systems Based on Integrated Photonics Devices». Tel. +7 919 146-96-48. E-mail: bakirova.li@ugatu.su

Voronkov Grigory Sergeevich, Ufa University of Science and Technology, 12/6, Karl Marx Street, Ufa, 450077, Russian Federation; Associated Professor of Telecommunication Systems Department, Senior Researcher of the Research Laboratory «Sensor Systems Based on Integrated Photonics Devices», PhD in Technical Science. Tel. +7 927 942-00-02. E-mail: voronkov.gs@ugatu.su

Lyubopytov Vladimir Sergeevich, Ufa University of Science and Technology, 12/6, Karl Marx Street, Ufa, 450077, Russian Federation; Senior Researcher of the Research Laboratory «Sensor Systems Based on Integrated Photonics Devices», PhD in Technical Science. Tel. +7 927 944-88-99. E-mail: lyubopytov.vs@ugatu.su

Stepanov Ivan Vasilievich, Ufa University of Science and Technology, 12/6, Karl Marx Street, Ufa, 450077, Russian Federation; Associated Professor of Telecommunication Systems Department, Research Engineer of the Research Laboratory «Sensor Systems Based on Integrated Photonics Devices», PhD in Technical Science. Tel. +7 927 335-56-19. E-mail: stepanov.iv@ugatu.su

Kutluyarov Ruslan Vladimirovich, Ufa University of Science and Technology, 12/6, Karl Marx Street, Ufa, 450077, Russian Federation; Associated Professor of Telecommunication Systems Department, Senior Researcher of the Research Laboratory «Sensor Systems Based on Integrated Photonics Devices», PhD in Technical Science. Tel. +7 927 967-00-06. E-mail: kutluyarov.rv@ugatu.su

Grakhova Elizaveta Pavlovna, Ufa University of Science and Technology, 12/6, Karl Marx Street, Ufa, 450077, Russian Federation; Associated Professor of Telecommunication Systems Department, Head of Research Laboratory of «Sensor Systems Based on Integrated Photonics Devices», PhD in Technical Science. Tel. +7 917 352-23-53. E-mail: grakhova.ep@ugatu.su

Bagmanov Valery Khusainovich, Ufa University of Science and Technology, 12/6, Karl Marx Street, Ufa, 450077, Russian Federation; Professor of Telecommunication Systems Department, Doctor of Technical Science. Tel. +7 903 352-71-90. E-mail: bagmanov.v@rambler.ru

References

1. Mirza A. et al. Silicon photonic microring resonators: a comprehensive design-space exploration and optimization under fabrication-process variations. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 2022, vol. 41, no. 10, pp. 3359–3372.
2. Steglich P. et al. Silicon photonic micro-ring resonators for chemical and biological sensing: a tutorial. *IEEE Sensors Journal*, 2022, vol. 22, no. 11, pp. 10089–10105.
3. Fallahi V., Kordrostami Z., Hosseini M. Sensitivity and quality factor improvement of photonic crystal sensors by geometrical optimization of waveguides and micro-ring resonators combination. *Scientific Reports*, 2024, vol. 14, no. 1, pp. 2001.
4. Voronkov G. et al. Design and modeling of a fully integrated microring-based photonic sensing system for liquid refractometry. *Sensors*, 2022, vol. 22, no. 23, pp. 9553.
5. Bawankar Y.R., Singh A. Microring resonators based applications in silicon photonics – a review. *5th Conference on Information and Communication Technology (CICT)*. India, Kurnool, 2021, pp. 1–6.
6. Kutluyarov R.V. et al. Design and modeling of a photonic integrated device for optical vortex generation in a silicon waveguide. *Computer optics*, 2021, vol. 45, no.3, pp. 324–330.
7. Fatkhiev D.M. et al. Recent advances in generation and detection of orbital angular momentum optical beams – a review. *Sensors*, 2021, vol. 21, no. 15, pp. 4988.
8. Stepanov I.V. et al. Wavelength-tunable vortex beam emitter based on silicon micro-ring with PN depletion diode. *Sensors*, 2022, vol. 22, no. 3, pp. 929.
9. Lyubopytov V.S. et al. Method for determination of the principal modes in a few-mode optical fiber using a multibranch DOE. *Computer Optics*, 2014, vol. 38, no. 4, pp. 727–736.
10. Cai X. et al. Integrated compact optical vortex beam emitters. *Science*, 2012, vol. 338, no. 6105, pp. 363–366.
11. Cai L. et al. Whispering gallery mode optical microresonators: structures and sensing applications. *Physica Status Solidi (A) Applications and Materials*, 2020, vol. 217, no. 6, pp. 1900825.
12. Lu X., McClung A., Srinivasan K. High-Q slow light and its localization in a photonic crystal microring. *Nature Photonics*, 2022, vol. 16, no. 1, pp. 66–71.

13. Zhang J. et al. An InP-based vortex beam emitter with monolithically integrated laser. *Nature Communications*, 2018, vol. 9, no 1, pp. 2652.
14. Li R. et al. Radially polarized orbital angular momentum beam emitter based on shallow-ridge silicon microring cavity. *IEEE Photonics Journal*, 2014, vol. 6, no. 3, pp. 1–10.
15. Jian Y.-H., Chow C.-W. Design and analysis of a compact micro-ring resonator signal emitter to reduce the uniformity-induced phase distortion and crosstalk in orbital angular momentum (OAM) division multiplexing. *Optics Express*, 2023, vol. 31, no. 2, pp. 810.
16. Chung H. et al. Generation of E-band metasurface-based vortex beam with reduced divergence angle. *Scientific Reports*, 2020, vol. 10, no. 1, pp. 8289.
17. Bakirova L.I. et al. Micro-ring resonator-based tunable vortex beam emitter. *Micromachines*, 2023, vol. 15, no. 1, pp. 34.
18. Acharyya N., Kozyreff G. Large Q factor with very small whispering-gallery-mode resonators. *Physical Review Applied*, 2019, vol. 12, no. 1, pp. 014060.
19. Li S. et al. Orbital angular momentum vector modes (de)multiplexer based on multimode micro-ring. *Optics Express*, 2018, vol. 26, no. 23, pp. 29895.
20. Li S. et al. Compact high-efficiency vortex beam emitter based on a silicon photonics micro-ring. *Optics Letters*, 2018, vol. 43, no. 6, pp. 1319.

Received 29.03.2024

УДК 535.21

ВЫРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО СТРУКТУРЕ ВОЛН ГОРОДСКИХ СЕТЕЙ, МИНИМАЛЬНО ИСКАЖАЮЩЕЙ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ ФИМД-СИГНАЛЫ

Виноградова И.Л.¹, Головина Е.Ю.²

¹ Уфимский университет науки и технологий, Уфа, РФ

² Институт нефтепереработки и нефтехимии Уфимского государственного нефтяного
технического университета в г. Салавате, Салават, РФ

E-mail: egolovina82@mail.ru

В статье исследуется задача построения абонентских разветвленных сетей xPON/MAN/RoF, на базе волоконно-оптических линиях передачи, с возможностью нереляционного управления. А именно – с передачей управляющей информации в составе абонентского сигнала. Предложено в качестве параметра, переносящего управляющую информацию, задействовать функцию изменения мгновенной длины волны оптического сигнала. Предложен способ моделирования таких сегментов, проанализирован характер функции изменения мгновенной длины волны оптического сигнала, выработаны рекомендации по включению световодов Erbium Doped Fiber Amplifier, и по методам подведения накачки к ним с точки зрения поддержания положительного chirпирования для информационно-управляющего сигнала с функцией изменения мгновенной длины волны. Предполагалось, что обеспечение положительного chirпирования позволит минимизировать искажения при передаче последнего. Сделан вывод о значительном влиянии разветвлений на функции изменения мгновенной длины волны оптического сигнала. Получены рекомендательные параметры сегментов для различной степени их разветвленности.

Ключевые слова: *Passive Optical Networks, Metropolitan Area Networks, Radio-over-Fiber; волоконно-оптическая линия передачи, Y-разветвители, Erbium Doped Fiber Amplifier, chirпирование*

Введение и постановка задачи

Развитие роботизированных систем, концепций «Интернета Вещей» (Internet of Things, IoT) и «Промышленного Интернета Вещей» (Industrial Internet of Things, IIoT) привело к увеличению процессов обмена информацией в сети. При этом рост последних обусловлен в основном взаимодействием не между людьми, или человеком и устройством, а между самими устройствами (автоматизированное управление беспилотной техни-

кой, и, в том числе, беспилотными летательными аппаратами (БПЛА), компьютеризация и телеметрия подвижных объектов, и т.д.), что повышает требования к скорости обработки сигналов и сообщений в системах связи. Отсюда возрастает актуальность задачи расширения возможностей управления сигналом, так как согласно [1], в настоящее время одним из весомых факторов задержки является продолжительность выполнения именно операций управления $\tau_{упр}$.

Необходимо заметить, что к настоящему времени уже выработан и успешно применяется один из подходов повышения скорости управления сетевыми операциями, предполагающий, в частности, понижение уровня OSI для конкретной задачи управления по отношению к уровню, на котором такая задача выполнялась традиционно. В том числе – перенос их и на физический уровень – с привлечением эффектов и процессов последнего, чему способствовало появление аналогичных телекоммуникационных задач [1; 2] в недавнем прошлом.

Среди таких подходов к настоящему моменту стандартизацию прошли не все, тем не менее, некоторые из них зарекомендовали себя положительно и сформировались в практически самостоятельные телекоммуникационные технологии. К таковым можно отнести технологию RoF (Radio-over-Fiber), основанную на получении радиочастоты (радиочастотного сигнала) при сложении (точнее – вычитании) двух оптических частот в нелинейном элементе [3], которая сочетает в себе преимущества волоконно-оптических систем с гибкостью и мобильностью, присущими радиосвязи. Эта технология позволяет передавать данные по волоконно-оптической линии передачи (ВОЛП) на значительные расстояния, а затем преобразовывать их в радиосигналы для беспроводной связи практически без использования традиционной цифровой аппаратуры для обработки сигналов, что обеспечивает миниатюризацию компонентной базы и увеличивает скорость выполнения операций.

Тем не менее, в RoF решены не все задачи: существует необходимость как дальнейшего повышения скорости управления сетевыми процессами [4], так и потребность в экономии телекоммуникационного ресурса (полосы пропускания), в том числе, ресурса управления [5; 6] – когда требуется поддержка массового количества устройств в сетях IoT, PoT. Для решения таких задач можно применить метод передачи управляющей информации в самом сигнале [2; 7] – так называемого «нереляционного управления» [2], особенно если метод будет основан на процессах физического уровня.

Применительно к IoT, PoT на базе RoF, нереляционное управление можно реализовать, если в оптическом импульсном сигнале, передаваемом по ВОЛП-RoF, задействовать дополнительное свойство/параметр физического уровня под передачу информации управления, которая затем будет использована, например, в радиосегменте [8]. Особый интерес будет представлять случай, когда такой параметр не относится к традиционно используемым в телекоммуникациях, что, соответственно, позволит сэкономить телекоммуникационный ресурс или вовсе не задействовать его под нужды управ-

ления. Так в [8] предложено в качестве такого параметра использовать функцию чирпа оптических импульсов [9] на ВОЛП-RoF, или, другими словами, функцию изменения мгновенной длины волны оптического сигнала (ФИМД). В [8] рассмотрен технический пример применения ФИМД в импульсном сигнале, передаваемом по оптоволоконной линии, для управления радиосегментом RoF-сети. Предполагалось, что на ВОЛП-RoF в основном применяются амплитудно-модулированные сигналы [3–6]. Также предложен вариант построения схемы оптической принципиальной управления фазированной антенной решеткой (ФАР) посредством ФИМД, содержащей специализированные оптические компоненты. Одним из которых является разработанный авторами преобразователь ФИМД→амплитуда [10]. Традиционно управление ФАР неизбежно потребует дополнительного канала управления, а в предложенном методе [8] управляющая информация передается скрыто и без задействования традиционного телекоммуникационного ресурса, так как ФИМД в волоконно-оптическом канале для передачи информации не используется и приемником не воспринимается. Метод [8] дополнительно позволяет перенести часть служебных функций из радиосегмента на оборудование, расположенное «на земле». Если радиосегмент обслуживает рой(рои) БПЛА, то упрощение аппаратуры и снижение энергетики взаимодействия на летающей сети является весомым положительным фактором, особенно с учетом значительной динамики перемещения объектов.

Здесь же, продолжая следовать концепции [8], авторы ставят задачу изучения вопроса передачи информационно-управляющего ФИМД-сигнала по волоконно-оптической части RoF, учитывая, что RoF-сегмент может быть включенным в состав сети доступа xPON (Passive Optical Networks (пассивная оптическая сеть)), либо в абонентское окончание городской сети Metropolitan Area Networks (MAN) [2], далее – сегмент MAN. В подобных случаях ВОЛП может быть протяженной (от неск. десятков км до сотни км), на которой уже будет проследиваться значительное действие дисперсии групповых скоростей (ДГС); может иметь разветвления, а также содержать волоконно-оптические усилители (ВОУ), что окажет влияние на как на ФИМД, сформированную удаленно, так и на форму импульсов. Представленное ниже моделирование направлено на получение рекомендаций по структуре и составу компонентной базы ВОЛП для xPON/MAN сегментов с RoF-окончанием, на котором используется удаленное ФИМД-управление. Предполагается, что существенной компонентой, обеспечивающей

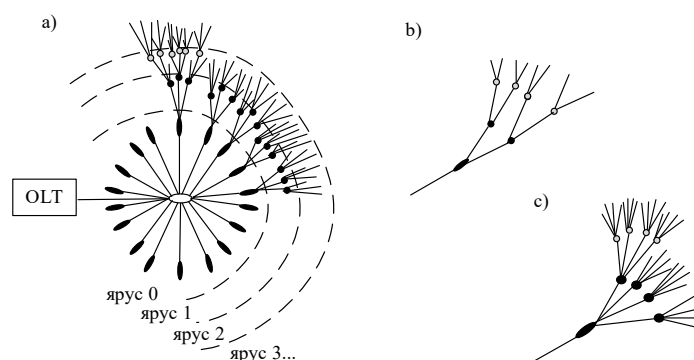


Рисунок 1. Принцип симметричного построения разветвлено-ярусных сегментов xPON/MAN с использованием пассивных разветвителей: а) иллюстрация ярусной структуры; б), в) примеры применения разветвителей 1×2 и 1×4 соответственно; OLT – активное оборудование линейного тракта

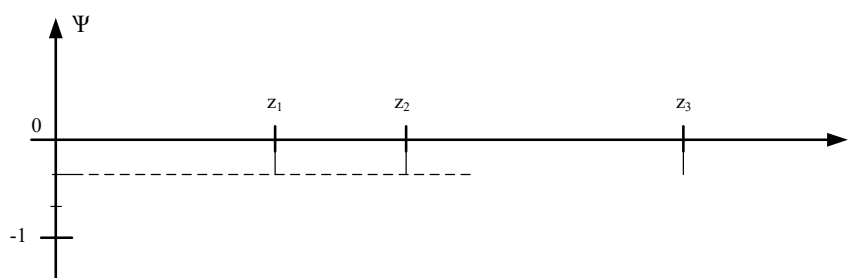


Рисунок 2. Принцип формирования коэффициента $\psi(z)$ для сегмента по рисунку 1а); отмечено вертикальными линиями в точках z_1 , z_2 и z_3

минимизацию искажений ФИМД-сигнала, является не смещение ФИМД в сторону отрицательного chirпирования, а получение рекомендаций по структуре ВОЛП для рассматриваемой категории сетей, обеспечивающей положительное chirпирование, с учетом того, что последнее является естественным фактором оптоволоконных линий.

Моделирование процесса прохождения информационно-управляющего ФИМД-сигнала через волоконно-оптическую линию передачи

Для моделирования примем, что сегмент xPON/MAN является сложно разветвленной многоярусной системой на базе Y-разветвителей с различной степенью разделения, рисунок 1. Вообще говоря, для создания таких структур могут использоваться как пассивные Y-разветвители, так и переключаемые коммутаторы по аналогии с [1; 2; 11; 12], но в настоящее время при построении сегментов рассматриваемой категории сетей в России последние практически не применяются.

С точки зрения унифицированности технического решения будем считать сегмент симметричным по оборудованию, что является предпочтительным для эксплуатирующихся сетей [13]. Это означает, что применяемые разветвители должны быть одно-

го типа, т.е. если применяются разветвители 1×2, то на его базе строится весь абонентский сегмент во всех ярусах, рисунок 1б.

Выполним оценку характера изменения ФИМД для входного импульса, представленного в виде супергауссовой функции [9] второго порядка, приблизительно соответствующего форме импульса амплитудно-модулированного сигнала. Для моделирования воспользуемся методикой расчета параметров импульса (мгновенных частоты и мощности), подробно изложенной в [9], в рамках которой предполагается, что электрическая напряженность поля световой волны на ВОЛП в каждый момент времени T в пределах длительности импульса может быть представлена в виде произведения комплекснозначных «продольного» и «поперечного» сомножителей. Причем ввиду отсутствия в задаче необходимости поперечного восприятия сигнала, «поперечной» составляющей можно пренебречь, задав ее значение равным 1. Для «продольной» составляющей, обозначенной через A_{1550} по аналогии с [9] с учетом наиболее распространенного значения длины волны излучения сигнала 1550 нм, изменяющейся под действием ДГС, километрического затухания и скачкообразного снижения мощности вследствие разделения в разветвителях (пусть с коэффициентом Ψ из-за их однообразия), можно записать:

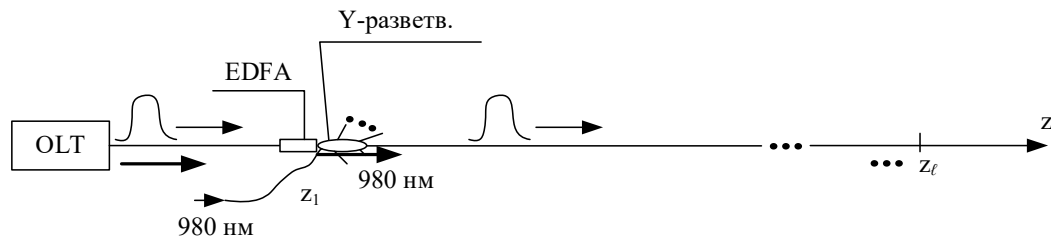


Рисунок 3. Пример расположения компонентов на сегменте xPON/MAN. В точках z_l располагаются EDFA и Y-разветвители

$$\frac{\partial A_{1550}}{\partial z} + \frac{j}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A_{1550}}{\partial T^2} = \frac{\alpha_{1550}}{2} \cdot |A_{1550}| + \Psi(z) \cdot |A_{1550}|, \quad (1)$$

где $\Psi(z)$ – характеризует размещение (удаленность) разветвителей по рисунку 1а), и может, например, определяться следующим образом, рисунок 2; α_{1550} – километрическое затухание оптического кабеля, $\alpha_{1550} < 0$; j – мнимая единица; T – время в системе отсчета, связанной с импульсом (изначальной длительности T_0 на входе ВОЛП), β_2 – дисперсионный параметр. В (1) и далее знак комплекснозначности (точка над A_{1550}) опущен для упрощения записи. Параметр β_1 явно не входит в (1), т.к. присутствует в пересчете от времени внешнего наблюдателя t , связанного, например, с ВОЛП, на время T по аналогии с [9].

Если на ВОЛП расположены усилители, например, перед разветвителями, что свойственно схемам построения xPON, то коэффициент Ψ может быть как меньше 0, так и больше 0. Соотношение (1) может использоваться также для схемы с различными параметрами разделения разветвителей, но тогда для каждого сегмента оно должно записываться индивидуально.

Первый этап моделирования ФИМД через параметр $\omega_{мгн}(T)$ (мгновенная частота излучения) для поступающего на сегмент импульса, представляемого в виде супергауссовой функции с chirпированными фронтами [7; 9; 14] на основе уравнения (1) показал, что характер разветвлений (количество разветвителей, порядок вдоль z и тип разветвителя) не влияет на выходную ФИМД. Последний показатель зависит только от действия дисперсии. Причем выходная ФИМД не зависит даже от значения z_1 , т.е. от удаления первого разветвителя от оптического линейного терминала (OLT, Optical Linear Terminal) (считаем, что на узле с OLT формируется информационно-управляющий ФИМД-сигнал). Влияние $\Psi(z)$ оказывается существенным только для выходной пиковой мощности импульса.

Поэтому для более детального исследования рассматриваемой задачи было сделано предпо-

ложение, что перед разветвителями может быть установлен волоконно-оптический усилитель на оптическом волокне, легированном ионами эрбия (EDFA, Erbium Doped Fiber Amplifier). Причем EDFA может располагаться и на неразветвленном протяженном сегменте (с длиной свыше ~50 км). Рассматривалось два случая подачи накачки – совместно с информационным сигналом [15] из ближайшего узла и независимо от информационного сигнала [2; 13]. Совместная подача накачки, с точки зрения влияния на ФИМД, согласно предыдущим исследованиям, смещает последнюю в область положительного chirпирования ввиду влияния на ВОЛП нелинейного преломления. Этот случай описывается следующим уравнением (в правой части которого также может присутствовать слагаемое с $\Psi(z)$):

$$\frac{\partial A_{1550}}{\partial z} + \frac{j}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A_{1550}}{\partial T^2} = \frac{\alpha_{1550}}{2} \cdot |A_{1550}| + j\gamma_{1550}^{HL} (|A_{1550}|^2) A_{1550}. \quad (2)$$

Нелинейный (НЛ) коэффициент в (2) γ_{1550}^{HL} рассчитывался по формуле: $\gamma_{1550}^{HL} \cong \frac{n_{HL,k}}{c \cdot s_{эфф}^{OB}} \cdot \omega_{u,0}$ [9], где $c \cdot s_{эфф}^{OB}$ – эффективная площадь модового пятна в световоде, примем $c \cdot s_{эфф}^{OB} \approx 1,2 \cdot 10^{-11}$ для световода типа SMF-28, c – скорость света в вакууме, $n_{HL,k}$ – нелинейный (керровский) показатель преломления, $\omega_{u,0}$ – центральная частота в спектре сигнала [9]. Очевидно, что влияние нелинейного режима преломления тем сильнее, чем выше мощность информационного сигнала. Разветвители же снижают последнюю, что позволяет сказать, что наличие разветвлений должно приводить к увеличению отрицательного характера chirпирования.

Независимая от информационного сигнала подача накачки к EDFA непосредственно не влияет на ФИМД, но обеспечивает создание нелинейного режима только внутри EDFA. В первом случае нелинейный режим внутри EDFA также учитывался; $s_{эфф}^{EDFA} \approx 0,4 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2$. В обоих случаях учитывалось усиление сигнала в EDFA, для чего в (2) вместо α_{1550} использовался коэффициент $\alpha_{1550}^{EDFA} > 0$.

Если необходимо сместить ФИМД еще значительнее в область положительного chirпирования,

то совместно с EDFA можно использовать также оптическое волокно (ОВ) с высокой керровской нелинейностью (НЛ ОВ) и/или оптические волокна со смещенной дисперсией (DSF), включаемые после EDFA, но до разветвителя [16; 17]. Для моделирования такого случая считалось допустимым воспользоваться «эффективным» $\gamma_{1550}^{НЛ-эфф}$, учитывающим дополнительный эффект от НЛ ОВ или DSF.

При наличии на ВОЛП EDFA, а также других упомянутых выше типов специальных световодов, моделирование проводилось следующим образом: для схемы расположения компонентов представленной, например, на рисунке 3, последовательно решалось уравнение (1), либо (2). Далее (в разветвителе) предполагалось, что A_{1550} скачкообразно уменьшается в коэффициент разветвления ξ , после чего импульс распространяется либо в соответствии с уравнением (2), если накачка продолжает присутствовать в линии, либо согласно соотношению:

$$\frac{\partial A_{1550}}{\partial z} + \frac{j}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A_{1550}}{\partial T^2} = -\frac{\alpha_{1550}}{2} \cdot |A_{1550}|.$$

Результаты

В результате последовательного численного интегрирования уравнений для импульса и компонентов линии передачи, параметры которых представлены выше, установлено следующее.

Для типовых параметров EDFA с коэффициентом передачи $\mathcal{R} \approx 1,35$ [18] и рекомендуемого среднего уровня пиковой мощности импульса в линии не более 10 мВт (по G.703) коэффициент разделения не должен быть выше 1×12 . Иначе амплитуда импульса уже снижается настолько, что за разветвителем на ВОЛП, построенным на ОВ SMF-28 ($\beta_2 \approx -22$ пс²/км [19] и $n_{SMF,k} \approx 2,4 \cdot 10^{-21}$ м²/Вт² [20]), не удастся добиться положительного чирпирования даже при наличии совместно передаваемой остаточной накачки (если на входе EDFA мощность накачки составляет 70 мВт [2; 18]). Следовательно, режим положительного чирпирования отсутствует, и ФИМД импульс сразу же начинает смещаться в область отрицательного чирпирования, при этом длительность импульса монотонно увеличивается, что также является негативным фактором.

Если в такой ситуации необходимо все же использовать разветвитель с большим коэффициентом разделения, то можно за разветвителем снова поставить EDFA, а накачку для него подавать, например, через один из портов разветвителя (как и показано на рисунке 3). Для этого разветвитель лучше взять не Y-образный, а звездообразный, обладающий менее направленными свойствами для проходящего излучения, и позволяющий тем

самым любой порт использовать как на вход, так и на выход. Но это решение приведет к необходимости расположения лазера накачки на 980 нм [15] вблизи разветвителя, а значит, сегмент перестанет классифицироваться как «полностью оптический». Также, это излучение можно подавать удаленно – например, по ранее «темному» световоду, либо совместно с сигналом.

Установлено также, что для минимизации эффекта увеличения текущей длительности импульса $T_{\text{и}}$ под воздействием дисперсии пиковую мощность импульса следует наращивать в ξ раз.

Увеличение мощности импульса на ВОЛП с EDFA можно получить как путем наращивания мощности накачки на входе $P_{0,EDFA}$, так и путем увеличения длины L_{EDFA} легированного световода (при меньшем значении $P_{0,EDFA}$). В первом случае преимуществом является то, что мощность как входной, так и остаточной накачки также будет выше, а значит при ее совместной передаче с сигналом она более эффективно создает нелинейный режим преломления. Т.е. увеличение $P_{0,EDFA}$ в световодах перед разветвителем позволяет пропорционально усилить положительное чирпирование (соответственно, уменьшить соотношение ω_{Π} / ω_3 , где ω_{Π} – получаемая круговая частота на переднем и ω_3 – на заднем фронте импульса).

Это, в свою очередь, позволяет уменьшить $\gamma_{1550}^{НЛ}$, как и длину НЛ ОВ, если специализированный световод используется совместно с EDFA (при моделировании указанные световоды рассматриваются как единый световод с $\gamma_{1550}^{НЛ-эфф}$), что в конечном итоге может снизить себестоимость схемы.

Но у первого способа также имеется и недостаток (соответственно, интерпретируемый как преимущество второго способа). А именно, с ростом P_{EDFA} увеличивается и шум спонтанного усиленного излучения (ASE) [2; 11; 12; 18], представляющего собой широкополосное излучение (в диапазоне длин волн усиления EDFA, т.е. от $\lambda_{\min} \approx 1530$ нм до $\lambda_{\max} \approx 1557$ нм), уровень мощности P_{ASE} которого пропорционален $|A_{1550}|^2$. Так, при наличии импульса, проходящего через EDFA, шум ASE выше, чем при отсутствии импульса, что позволяет говорить о мультипликативности рассматриваемого вида шума [18]. К мультипликативной составляющей возникающих помех также можно отнести и неизбежно возникающее отражение (от разветвителя, сварных швов, в т.ч. при стыковке EDFA, НЛ ОВ, DSF ОВ и пр.), амплитуда которого тем больше, чем выше мощность подаваемого излучения. Все это говорит о наличии компромисса между $P_{0,EDFA}$, а точнее, между P_{EDFA} , и L_{EDFA} .

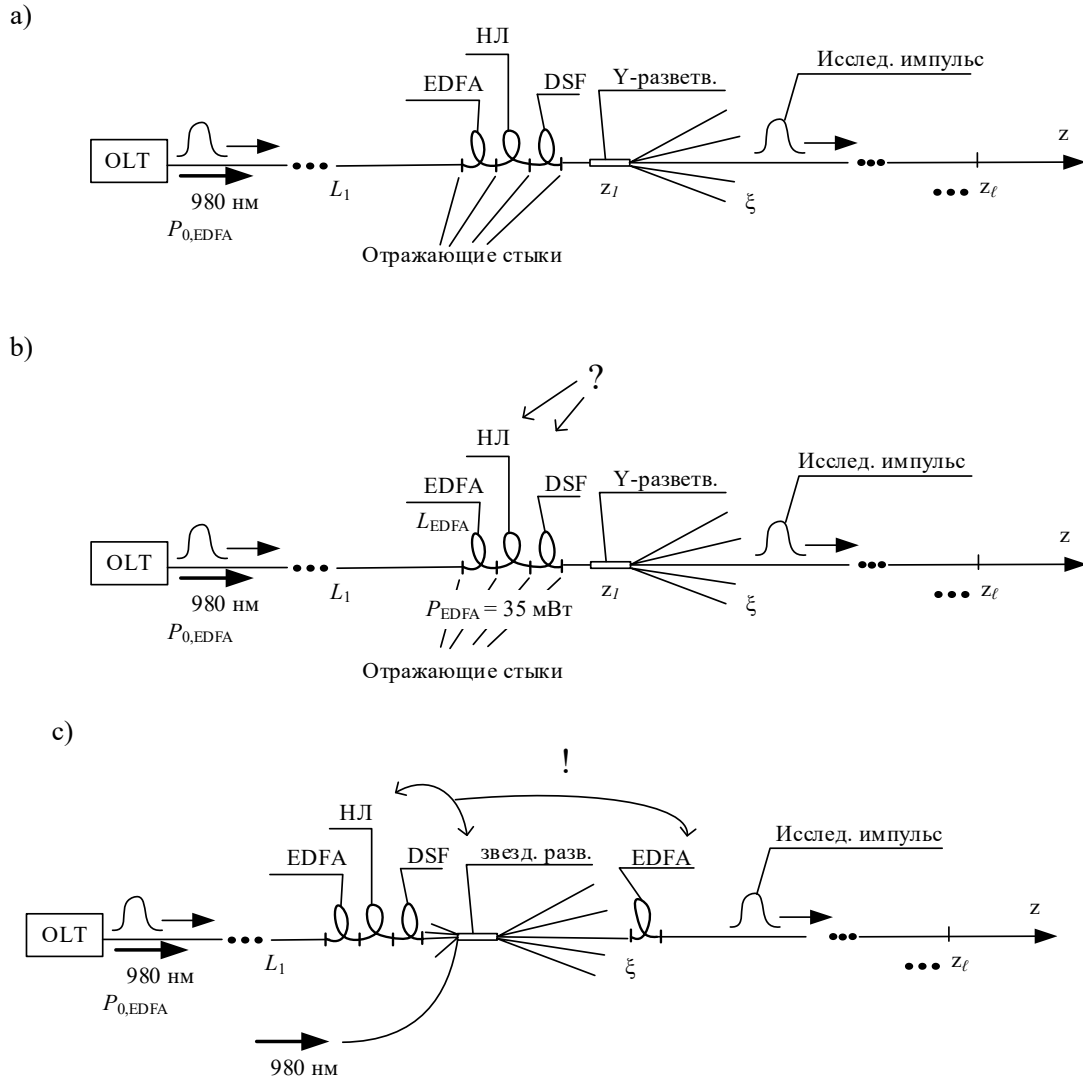


Рисунок 4. Исследуемые сегменты: а) высокая накачка EDFA (варьируемые параметры – на первом этапе $P_{0,EDFA}$ (наибольшее значение величины – 70 мВт) и L_1 , на втором этапе – добавлением нелинейного режима и/или $\beta_{2,DSF}$); б) ограниченная накачка EDFA большей длины (варьируются – на первом этапе L_1 , L_{EDFA} ; на втором этапе – дополнительное применение НЛ ОБ, DSF); в) многократное использование EDFA (с $L_{EDFA} = 10$ м и $P_{EDFA} = 35$ мВт с исследованием эффективности повторного применения и НЛ ОБ, DSF). Использование НЛ ОБ совместно с EDFA моделировалось путем увеличения от $\gamma_{1550}^{НЛ}$ до $\gamma_{1550}^{НЛ-эфф}$ на 10...12%

Для проведения оценки параметров сегмента, обеспечивающих средний вдоль z уровень соотношения сигнал/шум в линии $S/N \geq 14$ дБ, примем к рассмотрению следующие эмпирические соотношения [18]:

$P_{ASE} \approx \mu \cdot \sqrt{(P_{EDFA})^3}$ для входного информационного сигнала $|A_{1550}|^2 \sim 1$ мВт;

$$\mu \approx \eta \cdot P_{0,EDFA} \left(1 + \frac{L_{EDFA}}{L_0} \right), 10 \text{ м} \leq L_{EDFA} \leq 30. \quad (3)$$

Здесь η – размерный коэффициент (пока можно его значение принять ≈ 1); $L_0 = 10$ м. Увеличение P_{ASE} с нарастанием L_{EDFA} остается практически незаметным для $P_{EDFA} \leq 30...35$ мВт и для $L_{EDFA} \leq 30$ м. Уровень сигнала оценивался

как $S \approx |A_{1550}|^2$ по длине ВОЛП от OLT до абонентского полукомплекта, в том числе, до радиоборудования RoF (сумма по всем ответвляемым сегментам).

Сравнивались три случая:

- значительная накачка EDFA, расположенного перед разветвителем, возможно, сопровождаемым НЛ ОБ и/или DSF ОБ (рисунок 4а);
- меньшая накачка EDFA перед разветвителем, обладающего значительной L_{EDFA} (рисунок 4б);
- накачка EDFA перед и после разветвителя (рисунок 4с).

Уровень шума N определяется P_{ASE} и мощностью отраженного излучения P_{omp} , который суммируется по всем включенным (состыкованным) компонентам линии. Например, для ВОЛП

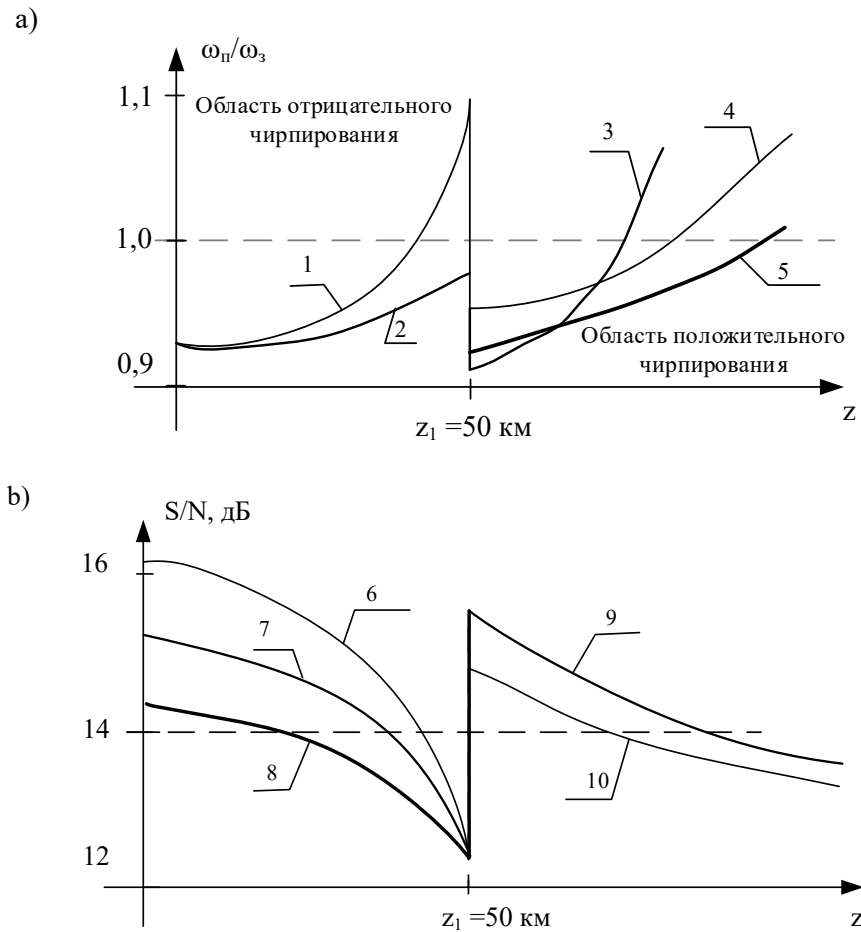


Рисунок 5. Иллюстрация характера распределения параметров сигнала, распространяющегося вдоль ВОЛП: а) отношение $\omega_{\pi}/\omega_{з}$, определяющее чирпирование; б) отношение «сигнал/шум» S/N в линии.

Таблица 1. Рекомендуемые параметры разветвленных ВОЛП для сегментов xPON/MAN с информационно-управляющими ФИМД-сигналами

Разветвитель до 1×6	1×6 ... 1×12	Свыше 1×12 (иссл. до 1×24)
Y-разветвитель	Y-разветвитель	Звездообразный разветвитель
EDFA до разветвителя		Двойной EDFA
$L_{EDFA} = 10$ м и $P_{EDFA} = 35$ мВт	$L_{EDFA} = 18...25$ м и $P_{EDFA} = 35$ мВт ¹	Перед разветвителем $L_{EDFA} = 25$ м; после – 18 м; $P_{EDFA} = 35$ мВт
$^2n_{НЛ,k} \cong 1...3 \times 10^{-17}$ м ² /Вт ²	$6...8 \times 10^{-17}$ м ² /Вт ²	$1...3 \times 10^{-17}$ м ² /Вт ²
$P_{ASE} \approx 0,11...0,15$ мВт	$P_{ASE} \approx 0,15...0,20$ мВт	$P_{ASE} \approx 0,20...0,30$ мВт

¹ Повышенная накачка в большей степени ухудшает ситуацию из-за нарастания ASE и отражений, чем улучшает; усиления лучше добиваться путем увеличения длины и повышением эффективности НЛ ОБ.

² Предполагалось, что согласно [16], длина НЛ ОБ составляет ~ 10 м

по рисунку 3 в первом сегменте $z \leq z_1$ значение $P_{отр,1550} = 0,3$ дБ + 0,2 дБ = 0,5 дБ, что соответствует отражению от сварного шва SMF-28 + EDFA и далее – EDFA + пиг-тейл разветвителя. Если добавляются НЛ ОБ и/или DSF ОБ, то количество стыков и уровень отраженного излучения, соответственно, повышается.

При определении $P_{отр}$ предполагается, что отраженная волна не передается за разветвитель, например, из сегмента $z_1 \leq z \leq z_2$ в предыдущий сегмент $z \leq z_1$. Кроме того, не учитывается отражение от сварных швов SMF-28 + SMF-28, т.к. оно присуще любому варианту построения линии и практически (в технической задаче можно принять) не

сказывается на определении искоемых параметров сегмента. Отражение на длине волны 980 нм пропорционально мощности P_{EDFA} в зоне отражения: $P_{EDFA} = P_{0,EDFA} \cdot e^{-\alpha_{980} \cdot L}$, и нормируемого коэффициента отражения от соответствующего стыка.

Модель, представленная уравнениями (1)–(3) совместно с соотношением $A_{1550}|_{z>z_1} = \frac{1}{\xi} \cdot [A_{1550}] - \Delta A_{1550}$, учитывающим разветвление и отражение, не позволяла анализировать порядок размещения EDFA, НЛ и DSF, т.к. предполагается, что этими свойствами обладает единый световод.

Обсуждение и заключение

По результатам моделирования с привлечением пакета Maple 12 для интегрирования уравнений (1), (2) с учетом (3) для определения параметров сегментов, установлено, что для получения наибольшего положительного chirпирования импульса за разветвителем (т.е. минимум соотношения ω_{II} / ω_3) следует придерживаться параметров, представленных в таблице 1.

При этом $S/N \geq 14$ дБ; $\omega_{II} / \omega_3 \approx 0,92$, что обеспечивает предотвращение уширения импульса при его дальнейшем распространении в соответствии с (2) на протяжении 45...48 км на ВОЛП с $\beta_2 \approx -22$ пс²/км и $n_{SMF,k} \approx 2,4 \cdot 10^{-21}$ м²/Вт². В качестве пояснений к представленным в таблице 1 данным на рисунке 5 приведены графики зависимостей ω_{II} / ω_3 и S/N вдоль z . Нелинейный характер графиков, близкий к экспоненциальному, по-видимому, связан, в основном, с характером потерь излучения 980 нм в линии, сопровождающего информационный сигнал.

На рисунке 5 обозначено:

- 1 и 6 – соответствует накачке $P_{0,EDFA}=70$ мВт;
- 2 и 8 – $P_{0,EDFA}=35$ мВт; 3 и 10 – соответствует «короткому» EDFA с $L_{EDFA}=10$ м со значительной накачкой $P_{0,EDFA}=70$ мВт;
- 4 – «длинному» EDFA с $L_{EDFA}=25$ м и небольшой накачкой $P_{0,EDFA}=35$ мВт;
- 5 и 9 – включение дополнительного EDFA с $L_{EDFA}=10$ м и $P_{0,EDFA}=35$ мВт после разветвителя;
- 7 – $L_{EDFA}=10$ м и $P_{0,EDFA}=45$ мВт.

Везде, кроме случая с дополнительно включенным EDFA, предпочтительной оказалась дистанционная подача накачки от OLT. Использование специализированных световодов может представлять интерес при разветвлении 1×12 и выше. При меньшем разветвлении в их применении нет необходимости ввиду того, что, с одной стороны, действие EDFA оказывается достаточным, а с другой

стороны – дополнительные световоды – это лишние стыки, приводящие к увеличению отражений на ВОЛП.

Полученные условия для положительного chirпирования призваны обеспечить минимизацию искажения информационно-управляющего ФИМД-сигнала посредством действия дисперсии на разветвленных ВОЛП при его передаче по сегментам xPON/MAN.

Литература

1. Гольдштейн А.Б., Гольдштейн Б.С. Технологии и протоколы MPLS. СПб: БХВ-Петербург, 2005. 304 с.
2. Mukherjee B. Optical Communication Networks. New York: McGraw-Hill, 2005. 576 p.
3. Karthikeyan R., Prakasam S. A survey on Radio over Fiber (RoF) for wireless broadband access technologies // International Journal of Computer Applications. 2013. Vol. 64, no. 12. P. 14–19.
4. THz systems exploiting photonics and communications technologies / J.C. Balzer [et al.] // IEEE Journal of Microwaves. 2023. Vol. 3, no. 1. P. 268–288.
5. Insua I.G., Plettemeier D., Schaeffer C.G. Simple remote heterodyne radio-over-fiber system for gigabit per second wireless access // Journal of Lightwave Technology. 2010. Vol. 28, no.16. P. 2289–2295.
6. Abraha S.T. Impulse radio ultra wideband over fiber techniques for broadband in-building network application. URL: <https://pure.tue.nl/ws/files/3666550/735363.pdf> (дата обращения: 31.03.2024).
7. Применение chirпированного сигнала для построения адаптивных волоконно-оптических сетей связи / И.Л. Виноградова [и др.] // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2013. № 2 (55). С. 20–28.
8. Метод управления сегментом RoF-сети с применением chirпированных оптических импульсов / И.Л. Виноградова [и др.] // Научные технологии. 2023. Т. 24, № 5. С. 37–52.
9. Agrawal G.P. Nonlinear Fiber Optics. Boston: Academic Press, 2009. 466 p.
10. Преобразователь chirп→амплитуда на базе эрбиевого волоконно-оптического усилителя для управления радиофотонными системами / И.Л. Виноградова [и др.] // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2019. Т. 22, № 4-2. С. 129–137.
11. Иванов А.Б. Волоконная оптика: компоненты, системы передачи, измерения. М.: Компания Сайрус-Системс, 1999. 670 с.

12. Жирард А. Компоненты системы DWDM: оптические усилители EDFA. EXFO, 2001. 381 с.
13. Гордиенко В.Н., Тверецкий М.С. Многоканальные телекоммуникационные системы. М.: Горячая линия – Телеком, 2009. 416 с.
14. Расчет параметров сегмента волоконно-оптической высокоскоростной системы передачи / И.Л. Виноградова [и др.] // Инфокоммуникационные технологии. 2013. Т. 11, № 1. С. 22–29.
15. Султанов А.Х., Усманов Р.Г., Виноградова И.Л. Сегмент системы передачи с усилителем EDFA // Датчики и системы. 2002. № 4. С. 21–33.
16. Волков К.А. Методы моделирования распространения оптических импульсов в линии с управлением дисперсией // Фотон-Экспресс. 2015. № 6 (126). С. 255.
17. Бурдин В.А., Дашков М.В., Волков К.А. Влияние параметров схемы компенсации хроматической дисперсии на работу волоконно-оптической линии передачи // Оптический журнал. 2011. № 2. С. 80–81.
18. Analyzing gain spectrum and ASE (Amplified Spontaneous Emission) of EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier) by using Matlab / A. Padavala [et al.] // International Journal of Engineering Research & Technology. 2018. Vol. 7, no. 2. P. 279–281. DOI: 10.17577/IJERTV7IS020151
19. Рекомендации МСЭТ G.650.1. Определения и методы тестирования для линейных детерминированных свойств одномодовых оптических волокон и кабелей. Женева, 2019. 82 с.
20. Рекомендации МСЭТ G.650.2. Определения и методы тестирования для статистических и нелинейных свойств одномодовых оптических волокон и кабелей. Женева, 2017. 74 с.

Получено 11.03.2024

Виноградова Ирина Леонидовна, д.т.н., профессор кафедры телекоммуникационных систем Уфимского университета науки и технологий. 450076, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32. Тел. +7 917 458-01-78. E-mail: vil-4@mail.ru

Головина Евгения Юрьевна, ст. преподаватель кафедры информационных технологий Института нефтепереработки и нефтехимии Уфимского государственного нефтяного технического университета в г. Салавате. 453250, Республика Башкортостан, г. Салават, ул. Губкина, 22 Б. Тел. +7 917 474-87-99. E-mail: egolovina82@mail.ru

RECOMMENDATIONS ON THE URBAN NETWORK FOTL STRUCTURE WITH THE LOWEST POSSIBLE LEVEL OF DISTORTION OF INFORMATION AND CONTROL ILCF-SIGNALS

Vinogradova I.L.¹, Golovina E.Yu.²

¹ *Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russian Federation*

² *Institute of Oil Refining and Petrochemistry of Ufa State Petroleum Technological University in Salavat, Salavat, Russian Federation*
E-mail: egolovina82@mail.ru

The article studies the problem of construction of subscriber branched networks xPON/MAN/RoF, on the base of fiber-optic transmission lines, with the possibility of non-relational control. Namely, enabling transmission of control information as a part of subscriber signal. It is proposed to use instantaneous wavelength change function of the optical signal (ILCF) as the control information with parametric characteristics. A method of modeling such segments was offered, nature of ILCF was analyzed, and recommendations on inclusion of EDFA light guides and methods of pumping to them from the point of view of maintaining positive chirp for the information-control ILCF signal were made. It was assumed that ensuring positive chirp will minimize distortion of the latter during its transmission. It is concluded that branching has significant effect on ILCF. Recommended parameters of segments for different degrees of their branching are also obtained as well.

Keywords: *Passive Optical Networks, Metropolitan Area Networks, Radio-over-Fiber; fiber optic transmission line, Y-branch, Erbium Doped Fiber Amplifier, chirping*

DOI: 10.18469/ikt.2023.21.4.06

Vinogradova Irina Leonidovna, Ufa University of Science and Technology, 32, Zaki Validi Street, Ufa, 450076, Republic of Bashkortostan, Russian Federation; Professor of Telecommunication Systems De-

partment, Doctor of Technical Sciences. Tel. +7 917 458-01-78. E-mail: vil-4@mail.ru

Golovina Evgenia Yurievna, Institute of Oil Refining and Petrochemistry of Ufa State Petroleum Technological University in Salavat, 22 B, Gubkina Street, Salavat, Republic of Bashkortostan, 453250, Russian Federation; Senior Lecturer of Information Technologies Department. Tel. +7 917 474-87-99. E-mail: egolovina82@mail.ru

References

1. Goldstein A.B., Goldstein B.S. *MPLS Technology and Protocols*. Saint Petersburg: BHV-Peterburg, 2005, 304 p. (In Russ.)
2. Mukherjee B. *Optical Communication Networks*. New York: McGraw-Hill, 2005, 576 p.
3. Karthikeyan R., Prakasam S. A survey on Radio over Fiber (RoF) for wireless broadband access technologies. *International Journal of Computer Applications*, 2013, vol. 64, no. 12, pp. 14–19.
4. Balzer J.C. et al. THz systems exploiting photonics and communications technologies. *IEEE Journal of Microwaves*, 2023, vol. 3, no. 1, pp. 268–288.
5. Insua I.G., Plettemeier D., Schaeffer C.G. Simple remote heterodyne radio-over-fiber system for gigabit per second wireless access. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, vol. 28, no.16, pp. 2289–2295.
6. Abraha S.T. Impulse radio ultra wideband over fiber techniques for broadband in-building network application. URL: <https://pure.tue.nl/ws/files/3666550/735363.pdf> (accessed: 31.03.2024).
7. Vinogradova I.L. et al. Application of a chirped signal for construction of adaptive fiber-optical networks. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviacionnogo tekhnicheskogo universiteta*, 2013, no. 2 (55), pp. 20–28. (In Russ.)
8. Vinogradova I.L. et al. ROF network segment control method using chirped optical pulses. *Naukoemkie tekhnologii*, 2023, vol. 24, no. 5, pp. 37–52. (In Russ.)
9. Agrawal G.P. *Nonlinear Fiber Optics*. Boston: Academic Press, 2009, 466 p.
10. Vinogradova I.L. et al. CHIRP-to-amplitude converter based on an erbium fiber optic amplifier for radio-photon systems control. *Physics of wave processes and radio engineering systems*, 2019, vol. 22, no 4-2, pp. 129–137. (In Russ.)
11. Ivanov A.B. *Fiber Optics: Components, Transmission Systems, Measurements*. Moscow: Kompaniya Sajrus-Sistems, 1999, 670 p. (In Russ.)
12. Girard A. *DWDM system components: EDFA optical amplifiers*. EXFO, 2001, 381 p.
13. Gordienko V.N., Tveretsky M.S. *Multichannel telecommunication systems*. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2009, 416 p. (In Russ.)
14. Vinogradova I.L. et al. The task of fiber-optical segment for high bit rate networking. *Infocommunicationnye tekhnologii*, 2013, vol. 11, no. 1, pp. 22–29. (In Russ.)
15. Sultanov A.H., Usmanov R.G., Vinogradova I.L. Transmission system segment with an EDFA amplifier. *Datchiki i sistemy*, 2002, no. 4, pp. 21–33. (In Russ.)
16. Volkov K.A. Modeling methods of optical pulse propagation in the line with dispersion control. *Photon-Express*, 2015, no. 6 (126), pp. 255. (In Russ.)
17. Burdin V.A., Dashkov M.V., Volkov K.A. How the parameters of a system for compensating chromatic dispersion affect the operation of a fiber-optic transmission line. *Opticheskij zhurnal*, 2011, no. 2, pp. 80–81. (In Russ.)
18. Padavala A. et al. Analyzing gain spectrum and ASE (Amplified Spontaneous Emission) of EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier) by using Matlab. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 2018, vol. 7, no. 2, pp. 279–281. DOI:10.17577/IJERTV7IS020151
19. ITU Recommendation G.650.1. Definitions and test methods for linear deterministic properties of single-mode optical fibers and cables. Geneva, 2019. 82 p.
20. ITU Recommendation G.650.2. Definitions and test methods for statistical and nonlinear properties of single-mode optical fibers and cables. Geneva, 2017. 46 p

Received 11.03.2024

АЛГОРИТМ ПРИЕМА В ЦЕЛОМ С ПОЭЛЕМЕНТНЫМ ПРИНЯТИЕМ РЕШЕНИЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МЕТОДА ФАЗОВОЙ МОДУЛЯЦИИ

Диязитдинов Р.Р., Сизиков И.С.

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ

E-mail: rinat.diyazitdinov@gmail.com, ilya.sizikov.99@mail.ru

Статья посвящена описанию алгоритма приема в целом с поэлементным принятием решения, который относится к группе алгоритмов с обратной связью по решению и используется для демодуляции дискретных сигналов, прошедших канал с памятью. В исследовании представлен пример обработки сигнала двухпозиционного фазового модулятора. На этом примере показаны особенности обработки, которые являются неочевидными при рассмотрении математической формулы, описывающей алгоритм демодуляции. По аналогии с представленным примером был разработан алгоритм для сигнала четырехпозиционного модулятора. Было проведено численное моделирование для определения помехоустойчивости на фоне аддитивного белого гауссова шума. В целях сравнения для той же самой модели канала связи было проведено моделирование с использованием фильтра-эквалайзера, подавляющего эффект памяти канала. На основе результатов моделирования были построены графики зависимости вероятности ошибок от соотношения «сигнал/шум».

Ключевые слова: прием в целом с поэлементным принятием решения, канал с памятью, помехоустойчивость, фазовая модуляция, численное моделирование, обратная связь по решению, демодуляция

Введение

Явление «памяти» в канале связи имеет простое физическое объяснение: радиосигнал, излучаемый передатчиком, представляет собой электромагнитную энергию, передаваемую в пространстве. Если между приемником и передатчиком нет препятствий, то кратчайшая траектория будет равна длине отрезка прямой линии, соединяющей их – расстоянию прямой видимости. Однако наличие отражающих поверхностей между приемником и передатчиком (например, поверхность Земли) приводит к формированию дополнительных траекторий, длина пути которых будет длиннее, чем у расстояния прямой видимости. За счет отражений и более длинной траектории в точку приема будут приходить копии исходного сигнала с задержкой по времени, затуханием и фазой, отличной от сигнала «прямой видимости». На рисунке 1 показан пример многолучевого распространения радиосигнала.

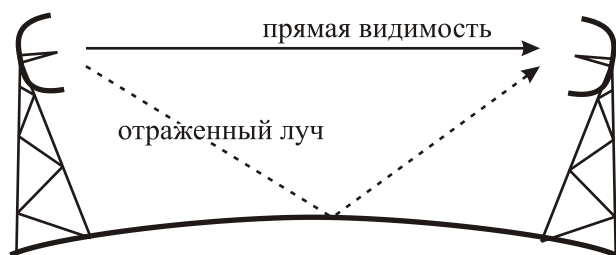


Рисунок 1. Многолучевое распространение

Если задержка между лучами превышает период передачи дискретного сигнала, то канал обрета-

ет «память»: копия сигнала, переданного в i -ый момент времени, будет регистрироваться в $(i+1)$ -ый момент времени. Память канала определяется количеством периодов, на которые распространяется переданный дискретный сигнал.

Для проведения теоретических изысканий (разработки алгоритмов, анализа, численного моделирования и т.д.) используется математическая модель канала, описываемая сверткой передаваемого сигнала и импульсной характеристики канала связи [1]:

$$r(k) = \sum_{i=0}^L h(i) \cdot s(k-i) + n(k), \quad (1)$$

где $s = [s(0), s(1) \dots]$ – последовательность дискретных сигналов;

$h = [h(0), h(1) \dots h(L)]$ – импульсная характеристика канала, L – память канала;

$n = [n(0), n(1) \dots]$ – шум;

$r = [r(0), r(1) \dots]$ – сигнал после канала (на входе приемника).

На рисунке 2 показан пример формирования сигнала на входе приемника для сигнала $s = [+1 \ -1 \ -1]$ для канала с импульсной характеристикой $h = [1 \ 0,5 \ 0,2]$ и нулевым уровнем шум.

Для демодуляции подобных сигналов разрабатываются специальные алгоритмы, которые учитывают наличие «памяти» у канала связи. Одним из таких алгоритмов является прием в целом с поэлементным принятием решений (ПЦПР) [2; 3].

В статье представлен обзор этого алгоритма применительно для систем передачи с фазовой модуляцией. В частности, рассмотрены особенности

обработки для двухпозиционного и четырехпозиционного фазового модулятора (ФМ).

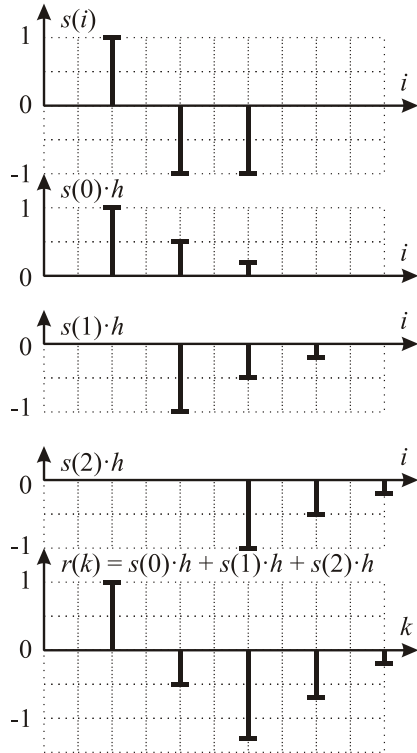


Рисунок 2. Пример формирования сигнала для канала с памятью

Демодуляция сигнала ФМ-2 по алгоритму приема в целом с поэлементным принятием решений

Алгоритм ПЦППР можно описать следующими формулами:

$$\hat{s}(i) = \tilde{s}(i), \quad (2)$$

$$\langle \tilde{s}(i), \tilde{s}(i+1), \dots, \tilde{s}(L) \rangle = \arg \min_{p(0), p(1), \dots, p(L)} (D), \quad (3)$$

$$D = \sum_{k=i}^{i+L} \left[r(k) - \sum_{j=1}^L h(j) \cdot \hat{s}(k-j) - \sum_{j=0}^L h(j) \cdot p(k-i-j) \right]^2,$$

где $\hat{s}(i)$ – это решение относительно переданного дискретного сигнала в i -ый момент времени;
 $\langle \tilde{s}(i), \tilde{s}(i+1), \dots, \tilde{s}(L) \rangle$ – это наиболее правдоподобная последовательность переданных дискретных сигналов в i -ый, $(i+1)$ -ый .. $(i+L)$ -ый момент времени, определенная по последовательности принятых сигналов $r(i), r(i+1) \dots r(i+L)$;
 $p(0), p(1) \dots p(L)$ – гипотеза, определяющая последовательность переданных дискретных сигналов в i -ый, $(i+1)$ -ый .. $(i+L)$ -ый момент времени;
 L – это память канала.

Выражение $\sum_{j=1}^L h(j) \cdot \hat{s}(k-j)$ описывает «обратную связь по решению» в алгоритме ПЦППР.

Следует также отметить две особенности использования формулы (3).

Во-первых, в выражении $\sum_{j=1}^L h(j) \cdot \hat{s}(k-j)$, если $k-j \geq i$, то $\hat{s}(k-j) = 0$. Физический смысл заключается в том, что при принятии решения относительно последовательности $\langle \tilde{s}(i), \tilde{s}(i+1), \dots, \tilde{s}(L) \rangle$ значения $\hat{s}(i)$, $\hat{s}(i+1)$, и т.д. неизвестны, поэтому если индекс $k-j \geq i$, то $\hat{s}(k-j)$ в формуле (3) приравнивается в нулю.

Во-вторых, в выражении

$$\sum_{j=0}^L h(j) \cdot p(k-i-j),$$

если $k-i-j < 0$, то $p(k-i-j) = 0$, то есть $p(-1) = 0, p(-2) = 0$ и т.д., так как эти сигналы определены только при индексах больше или равных нулю.

Ниже представлено описание демодуляции по алгоритму ПЦППР на примере следующего канала связи (рисунок 3).

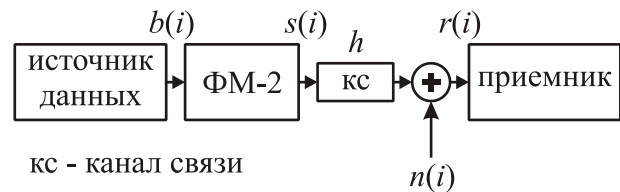


Рисунок 3. Модель канала связи с памятью

Допустим, передается последовательность из 6 символов $b = [1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0]$.

Двухпозиционный фазовый модулятор (ФМ-2) [4] осуществляет преобразование логической единицы в отсчет «+1» и нуля в «-1».

Пусть импульсная характеристика описывает канал с памятью $L = 2$: $h = [1, 0 \ 0, 5 \ 0, 2]$, а шум в канале связи отсутствует.

На основе этих исходных данных можно найти сигнал $r(i)$ на входе приемника и описать работу алгоритма демодуляции поэтапно.

Сигнал на входе приемника определяется по формуле (1), и применительно к рассматриваемому примеру записывается следующим образом:

$$r(k) = \sum_{i=0}^2 h(i) \cdot s(k-i),$$

$$r(k) = h(0) \cdot s(k) + h(1) \cdot s(k-1) + h(2) \cdot s(k-2).$$

В таблице 1 показано формирование информационного сигнала. В таблице 2 – сигнала на входе приемника.

Таблица 1. Формирование сигнала ФМ-2 на входе канала связи

i	$b(i)$	$s(i)$
0	1	1
1	0	-1
2	1	1
3	1	1
4	0	-1
5	0	-1

Таблица 2. Формирование сигнала ФМ-4 на выходе канала связи

k	$r(k)$
0	$h(0) \cdot s(0) + h(1) \cdot s(-1) + h(2) \cdot s(-2) = 1 \cdot 1 + 0,5 \cdot 0 + 0,2 \cdot 0 = 1$
1	$h(0) \cdot s(1) + h(1) \cdot s(0) + h(2) \cdot s(-1) = 1 \cdot (-1) + 0,5 \cdot 1 + 0,2 \cdot 0 = -0,5$
2	$h(0) \cdot s(2) + h(1) \cdot s(1) + h(2) \cdot s(0) = 1 \cdot 1 + 0,5 \cdot (-1) + 0,2 \cdot 1 = 0,7$
3	$h(0) \cdot s(3) + h(1) \cdot s(2) + h(2) \cdot s(1) = 1 \cdot 1 + 0,5 \cdot 1 + 0,2 \cdot (-1) = 1,3$
4	$h(0) \cdot s(4) + h(1) \cdot s(3) + h(2) \cdot s(2) = 1 \cdot (-1) + 0,5 \cdot 1 + 0,2 \cdot 1 = -0,3$
5	$h(0) \cdot s(5) + h(1) \cdot s(4) + h(2) \cdot s(3) = 1 \cdot (-1) + 0,5 \cdot (-1) + 0,2 \cdot 1 = -1,3$
6	$h(0) \cdot s(6) + h(1) \cdot s(5) + h(2) \cdot s(4) = 1 \cdot 0 + 0,5 \cdot (-1) + 0,2 \cdot (-1) = -0,7$
7	$h(0) \cdot s(7) + h(1) \cdot s(6) + h(2) \cdot s(5) = 1 \cdot 0 + 0,5 \cdot 0 + 0,2 \cdot (-1) = -0,2$

Таким образом,

$$s = [1 \ -1 \ 1 \ 1 \ -1 \ -1];$$

$$r = [1 \ -0,5 \ 0,7 \ 1,3 \ -0,3 \ -1,3 \ -0,7 \ -0,2].$$

Ниже представлена демодуляция первых трех дискретных сигналов. Демодуляция сигналов №1 и 2 отличается от №3, так как они представляют «краевой случай» из-за отсутствия сигналов на интервале L перед ними. Сигнал №3 демодулируется в соответствии с формулами (2) и (3). А все последующие сигналы демодулируются как №3.

Формула (3) для рассматриваемой модели канала связи ($L=2$) имеет следующий вид:

$$\langle \tilde{s}(i), \tilde{s}(i+1), \tilde{s}(i+2) \rangle = \arg \min_{p(0), p(1), p(2)} (D), \quad (4)$$

$$D = \sum_{k=i}^{i+2} \left[r(k) - \sum_{j=1}^2 h(j) \cdot \hat{s}(k-j) - \sum_{j=0}^2 h(j) \cdot p(k-i-j) \right]^2 ;$$

$$D = \left[r(i) - h(1) \cdot \hat{s}(i-1) - h(2) \cdot \hat{s}(i-2) - h(0) \cdot p(0) - h(1) \cdot p(-1) - h(2) \cdot p(-2) \right]^2 + \\ + \left[-r(i+1) - h(1) \cdot \hat{s}(i) - h(2) \cdot \hat{s}(i-1) - h(0) \cdot p(1) - h(1) \cdot p(0) - h(2) \cdot p(-1) \right]^2 + \\ + \left[-r(i+2) - h(1) \cdot \hat{s}(i+1) - h(2) \cdot \hat{s}(i) - h(0) \cdot p(2) - h(1) \cdot p(1) - h(2) \cdot p(0) \right]^2. \quad (5)$$

Демодуляция сигнала №1 определяется по формуле (5) после подстановки $i = 0$.

Переменные:

$$\hat{s}(i+1) = s(1) = 0,$$

$$\hat{s}(i) = s(0) = 0,$$

$$\hat{s}(i-1) = s(-1) = 0,$$

$$\hat{s}(i-2) = s(-2) = 0.$$

С учетом этого получается выражение (5):

$$D = \left[r(0) - h(0) \cdot p(0) \right]^2 + \\ + \left[r(1) - h(0) \cdot p(1) - h(1) \cdot p(0) \right]^2 + \\ + \left[r(2) - h(0) \cdot p(2) - h(1) \cdot p(1) - h(2) \cdot p(0) \right]^2. \quad (6)$$

Выражение, содержащееся внутри $\arg \min(\cdot)$ представляет собой метрику. Значение метрик представлено в таблице 3.

Минимальная метрика соответствует последовательности:

$$\langle \tilde{s}(0), \tilde{s}(1), \tilde{s}(2) \rangle = \langle p(0), p(1), p(2) \rangle ;$$

$$\langle \tilde{s}(0), \tilde{s}(1), \tilde{s}(2) \rangle = \langle 1 \ -1 \ 1 \rangle.$$

Соответственно, сигнал №1 будет демодулирован как:

$$\hat{s}(0) = \tilde{s}(0) = 1.$$

Таблица 3. Расчет метрик при демодуляции сигнала ФМ-2 при $i = 0$

N	$p(0)$	$p(1)$	$p(2)$	метрика
1	-1	-1	-1	10,76
2	-1	-1	1	5,16
3	-1	1	-1	6,96
4	-1	1	1	5,36
5	1	-1	-1	4,00
6	1	-1	1	0,00
7	1	1	-1	5,00
8	1	1	1	5,00

Демодуляция сигнала №2 определяется по формуле (5) после подстановки $i = 1$.

Переменные:

$$\hat{s}(i+1) = s(2) = 0,$$

$$\hat{s}(i) = s(1) = 0,$$

$$\hat{s}(i-1) = s(0) = 1,$$

$$\hat{s}(i-2) = s(-1) = 0.$$

С учетом этого выражение (5) запишется таким образом:

$$D = [r(1) - h(1) \cdot \hat{s}(0) - h(0) \cdot p(0)]^2 + \\ + [r(2) - h(0) \cdot p(1) - h(1) \cdot p(0)]^2 + \\ + [r(3) - h(0) \cdot p(2) - h(1) \cdot p(1) - h(2) \cdot p(0)]^2. \quad (7)$$

Значение метрик представлено в таблице 4.

Таблица 4. Расчет метрик при демодуляции сигнала ФМ-2 при $i = 1$

N	$p(0)$	$p(1)$	$p(2)$	метрика
1	-1	-1	-1	13,00
2	-1	-1	1	5,00
3	-1	1	-1	4,00
4	-1	1	1	0,00
5	1	-1	-1	11,76
6	1	-1	1	5,36
7	1	1	-1	7,56
8	1	1	1	5,16

Минимальная метрика соответствует последовательности:

$$\langle \tilde{s}(1), \tilde{s}(2), \tilde{s}(3) \rangle = \langle -1 \ 1 \ 1 \rangle.$$

Соответственно, сигнал №2 будет демодулирован как:

$$\hat{s}(1) = \tilde{s}(1) = -1.$$

По аналогии с обработкой первых двух сигналов представлена демодуляция сигнала №3 при $i = 2$.

Переменные:

$$\hat{s}(i+1) = s(3) = 0,$$

$$\hat{s}(i) = s(2) = 0,$$

$$\hat{s}(i-1) = s(1) = -1,$$

$$\hat{s}(i-2) = s(0) = 1.$$

С учетом этого выражение (5) запишется как:

$$D = [r(2) - h(1) \cdot \hat{s}(1) - h(2) \cdot \hat{s}(0) - h(0) \cdot p(0)]^2 + \\ + [r(3) - h(2) \cdot \hat{s}(1) - h(0) \cdot p(1) - h(1) \cdot p(0)]^2 + \\ + [r(4) - h(0) \cdot p(2) - h(1) \cdot p(1) - h(2) \cdot p(0)]^2. \quad (8)$$

Значение метрик представлено в таблице 5.

Таблица 5. Расчет метрик при демодуляции сигнала ФМ-2 при $i = 2$

N	$p(0)$	$p(1)$	$p(2)$	метрика
1	-1	-1	-1	14,96
2	-1	-1	1	13,36
3	-1	1	-1	5,16
4	-1	1	1	7,56
5	1	-1	-1	5,00
6	1	-1	1	5,00
7	1	1	-1	0,00
8	1	1	1	4,00

Минимальная метрика соответствует последовательности:

$$\langle \tilde{s}(2), \tilde{s}(3), \tilde{s}(4) \rangle = \langle 1 \ 1 \ -1 \rangle.$$

Соответственно, сигнал №3 будет демодулирован как:

$$\hat{s}(2) = \tilde{s}(2) = 1.$$

Все последующие символы демодулируются также, как и сигнал №3.

При использовании двухпозиционной фазовой модуляции информационный сигнал может быть представлен вещественным числом. Но при использовании n -позиционной фазовой модуляции сигнал будет описываться комплексным числом. В этом случае алгоритм ПЦППР поменяется. В следующем разделе представлено описание алгоритма для четырехпозиционной фазовой модуляции (ФМ-4).

Демодуляция сигнала ФМ-4 по алгоритму приема в целом с поэлементным принятием решений

В случае ФМ-4 [5] одно положение в сигнальной диаграмме будет определять 2 бита информации.

С учетом того, что ФМ-4 описывается комплексными числами, алгоритм ПЦППР запишется в виде:

$$\langle \tilde{s}(i), \tilde{s}(i+1), \dots, \tilde{s}(L) \rangle = \arg \min_{p(0), p(1), \dots, p(L)} (D),$$

$$D = \sum_{k=i}^{i+L} (\text{Re}^2[G] + \text{Im}^2[G]), \quad (3)$$

$$G = r(k) - \sum_{j=1}^L h(j) \cdot \hat{s}(k-j) - \sum_{j=0}^L h(j) \cdot p(k-i-j),$$

где: $p(0), p(1), \dots, p(L)$ принимает все возможные значения из сигнального созвездия ФМ-4; Re , Im – действительная и мнимая части комплексного числа.

Таким образом, алгоритм для демодуляции сигнала ФМ-4 будет отличаться только наличием

вычисления квадрата разности для мнимой части сигнала.

Ниже представлен пример демодуляции сигнала на следующем примере.

Допустим, сигнальное созвездие ФМ-4 определяется следующим образом (см. рис. 4).

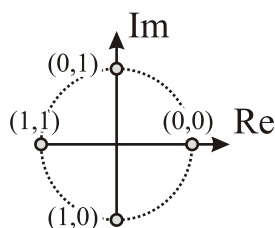


Рисунок 4. Сигнальное созвездие ФМ-4

Соответствие между последовательностью информационных символов и сигналом будет следующим: 00 – «+1», 01 – «+j», 10 – «-j», 11 – «-1».

Информационная последовательность: $b = [1\ 0\ 1\ 1\ 0\ 0]$. Импульсная характеристика канала: $h = [1,0\ 0,5]$.

В таблице 6 показано формирование информационного сигнала. В таблице 7 – формирование сигнала на входе приемника.

Таблица 6. Формирование сигнала ФМ-4 на входе канала связи

i	$b(i)$	$s(i)$
0	10	-j
1	11	-1
2	00	1

Таблица 7. Формирование сигнала ФМ-4 на выходе канала связи

k	$r(k)$
0	$h(0) \cdot s(0) + h(1) \cdot s(-1) = -j \cdot 1 + 0,5 \cdot 0 = -j$
1	$h(0) \cdot s(1) + h(1) \cdot s(0) = 1 \cdot (-1) + 0,5 \cdot (-j) = -1 - 0,5j$
2	$h(0) \cdot s(2) + h(1) \cdot s(1) = 1 \cdot 1 + 0,5 \cdot (-1) = 0,5$
3	$h(0) \cdot s(3) + h(1) \cdot s(2) = 1 \cdot 0 + 0,5 \cdot 1 = 0,5$

Таким образом,

$$s = [-j\ -1\ 1];$$

$$r = [-j\ -1-0,5j\ 0,5\ 0,5].$$

Ниже представлен расчет метрики для демодуляции сигнала в момент $i = 0$ и $i = 1$.

$$\text{При } i = 0: \hat{s}(i-1) = \hat{s}(-1) = 0, \quad \hat{s}(i) = \hat{s}(0) = 0.$$

Вычисление метрики представлено в таблице 8.

Минимальная метрика соответствует последовательности:

$$\langle \tilde{s}(0), \tilde{s}(1) \rangle = \langle -j\ -1 \rangle.$$

Соответственно, сигнал №1 будет демодулирован как:

$$\hat{s}(0) = \tilde{s}(0) = -j.$$

$$\text{При } i = 1: \hat{s}(i-1) = \hat{s}(0) = -j, \quad \hat{s}(i) = \hat{s}(1) = 0.$$

Таблица 8. Расчет метрик при демодуляции сигнала ФМ-4 при $i = 0$

N	$p(0)$	$p(1)$	метрика
1	1	1	8,5
2	1	j	6,5
3	1	-j	4,5
4	1	-1	2,5
5	j	1	9,0
6	j	j	9,0
7	j	-j	5,0
8	j	-1	5,0
9	-j	1	4,0
10	-j	j	2,0
11	-j	-j	2,0
12	-j	-1	0,0
13	-1	1	4,5
14	-1	j	4,5
15	-1	-j	2,5
16	-1	-1	2,5

Вычисление метрики представлено в таблице 9.

Минимальная метрика соответствует последовательности:

$$\langle \tilde{s}(1), \tilde{s}(2) \rangle = \langle -1\ 1 \rangle.$$

Соответственно сигнал №2 будет демодулирован как:

$$\hat{s}(1) = \tilde{s}(1) = -1.$$

Таблица 9. Расчет метрик при демодуляции сигнала ФМ-4 при $i = 1$

N	$p(0)$	$p(1)$	метрика
1	1	1	5,0
2	1	j	5,0
3	1	-j	5,0
4	1	-1	5,0
5	j	1	2,5
6	j	j	4,5
7	j	-j	2,5
8	j	-1	4,5
9	-j	1	2,5
10	-j	j	2,5
11	-j	-j	4,5
12	-j	-1	4,5
13	-1	1	0,0
14	-1	j	2,0
15	-1	-j	2,0
16	-1	-1	4,0

Значение дискретного сигнала определяет переданную информационную последовательность (рисунок 4). Например, $\hat{s}(0) = -j$ соответствует битам «10».

Если сравнить последовательность исходных бит (таблица 6) и результат демодуляции по алгоритму ПЦППР, то можно убедиться, что последовательности совпадают.

Численное моделирование

Для описанного алгоритма ПЦППР для ФМ-4 было проведено численное моделирование с целью определения вероятности ошибки от соотношения сигнал/шум [6]. Распределение шума соответствовало нормальному значению (аддитивный белый гауссовый шум). Для сравнения было проведено моделирование на тех же самых данных для демодулятора на основе эквалайзера, подавляющего эффект памяти канала [7].

На рисунке 5 показаны результаты измерений.

Как можно видеть из представленного графика, алгоритм ПЦППР обладает более высокой помехозащищенностью, чем эквалайзер.

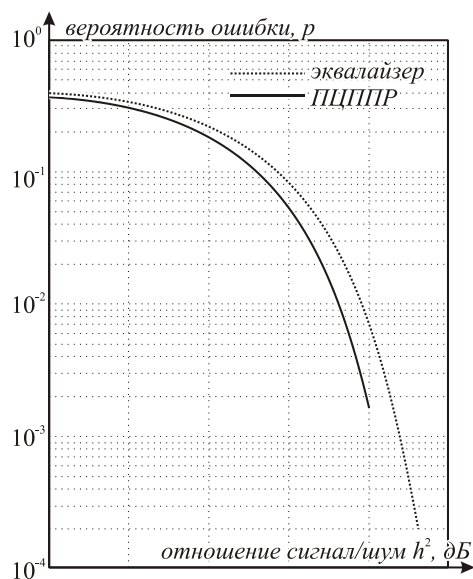


Рисунок 5. Зависимость вероятности ошибки от отношения сигнал/шум при ФМ-4

Заключение

В работе представлено описание алгоритма ПЦППР для двух видов фазовой модуляции: двухпозиционной и четырехпозиционной. В приведенных примерах были рассмотрены особенности обработки для данного алгоритма.

Теоретические графики, полученные в ходе численного моделирования, показывают, что алгоритм ПЦППР обеспечивает более высококачественную демодуляцию сигнала, чем эквалайзеры. Одной из причин является то, что эквалайзер приводит к увеличению мощности шума, так как в ходе коррекции

импульсной характеристики происходит подавление «памяти», но некоррелированные отсчеты шума уменьшают эквивалентное отношение сигнал/шум, что повышает вероятность ошибки. А алгоритм ПЦППР, в отличие от эквалайзера не создает такой эффект. Данный результат не противоречит существующим исследованиям [8]. Дальнейшие работы будут посвящены исследованию алгоритма ПЦППР для демодуляции в системах с MIMO (Multiple Input Multiple Output) с целью дополнения уже имеющихся исследований в этой области [9–11].

Литература

1. Прокис Дж. Цифровая связь / под ред. Д.Д. Кловского; пер. с англ. М.: Радио и связь, 2000. 800 с.
2. Способ демодуляции дискретных сигналов и устройство для его применения: Патент 2102836. Российская Федерация. № 4898997/09 / Д.Д. Кловский (RU); В.Г. Карташевский (RU); С.А. Белоус (RU); заявл. 01.08.1991; опубл. 20.01.1998.
3. Карташевский В.Г. Рекуррентная модификация алгоритма приема «в целом» с поэлементным принятием решения // Радиотехника. 2016. № 6. С. 149–153.
4. Двухпозиционная фазовая модуляция (BPSK). URL: <https://digteh.ru/UGFSvSPS/modul/BPSK/> (дата обращения: 15.03.2024).
5. Четырехпозиционная фазовая модуляция (QPSK). URL: <https://digteh.ru/UGFSvSPS/modul/QPSK/> (дата обращения: 15.03.2024).
6. Николаев Б.И., Чингаева А.М. Энергетические соотношения при компьютерном моделировании процессов в цифровых системах передачи информации // Инфокоммуникационные технологии. 2006. Т. 4, № 1. С. 53–57.
7. Карташевский В.Г. Обработка пространственно-временных сигналов в каналах с памятью. М.: Радио и связь, 2000. 272 с.
8. Карташевский В.Г., Шатилов С.В. Прием пакетов сигналов ФМ-4 в каналах с рассеянием // Радиотехника. 2011. Т.65, № 7. С. 26–35.
9. Коняева О.С. Моделирование системы MIMO в канале с памятью // Инфокоммуникационные технологии. 2014. Т. 12, № 3. С. 32–36.
10. Карташевский В.Г., Коняева О.С., Семенов Е.С. Прием «в целом» для системы MIMO в канале с памятью. Успехи современной радиоэлектроники. 2015. № 11. С. 49–53.
11. Карташевский В.Г., Коняева О.С., Семенов Е.С. Анализ характеристик алгоритмов V-BLAST и субоптимального ML в системе MIMO // Радиотехника. 2017. № 1. С. 131–136.

Получено 20.03.2024

Диязитдинов Ринат Радмирович, к.т.н., доцент кафедры сетей и систем связи (ССС) Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ). 443010, Российская Федерация, г. Самара, ул. Л. Толстого, 23. Тел. +7 927 708-47-39. E-mail: r.diyazitdinov@psuti.ru

Сизиков Илья Сергеевич, студент кафедры СССР ПГУТИ. 443010, Российская Федерация, г. Самара, ул. Л. Толстого, 23. Тел. +7 937 206-60-82. E-mail: ilya.sizikov.99@mail.ru

RECEPTION ALGORITHM AS A WHOLE WITH ELEMENT-BY-ELEMENT DECISION MAKING USING THE PHASE MODULATION METHOD

Diyazitdinov R.R., Sizikov I.S.

Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russian Federation

E-mail: r.diyazitdinov@psuti.ru

The article is aimed to provide reception algorithm as a whole with element-by-element decision making. It belongs to the group of decision, making algorithms with feedback. It is used to demodulate discrete signals that have passed through a memory channel. The study presents an example of signal processing of a binary phase modulator. This example shows processing features that are not obvious for considering of the mathematical formula that describes demodulation algorithm. Another algorithm was developed for a quadrature phase modulator as well. The noise immunity for additive gaussian noise was estimated by the numerical simulations. The same researches was carried out using an equalizer filter that suppresses channel memory effect. Simulation results were used as the base for the graphs of the error probability versus signal-to-noise ratio.

Keywords: *reception algorithm as a whole with element-by-element decision making, memory channel, noise immunity, phase modulation, numerical simulation, decision making with feedback, demodulation*

DOI: 10.18469/ikt.2023.21.4.07

Diyazitdinov Rinat Radmirovich, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 23, L. Tolstoy Street, Samara, Russian Federation; Associate Professor of Chair Network and Telecommunication System Department. Tel. +7 927 708-47-39. E-mail: r.diyazitdinov@psuti.ru

Sizikov Ilya Sergeevich, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 23, L. Tolstoy Street, Samara, Russian Federation; Student of Chair Network and Telecommunication System Department. Tel. +7 937 206-60-82. E-mail: ilya.sizikov.99@mail.ru

References

1. Prokis J. *Digital Communication*. Ed by D.D. Klovsky. Transl. From English. Moskow: Radio i svyaz', 2000, 800 p. (In Russ.)
2. Method of Demodulation of Discrete Signals and Device for its Implementation: patent 2102836. Russian Federation No. 4898997/09 / D.D. Klovsky (RU); V.G. Kartashevsky (RU); S.A. Belous (RU); zayavl. 01.08.1991; opubl. 20.01.1998. (In Russ.)
3. Kartashevsky V.G. Recurrent modification algorithm implementation reception «on the whole» with element-wise decision. *Radiotekhnika*, 2016, no. 6, pp. 149–153. (In Russ.)
4. On-off phase modulation (BPSK). URL: <https://digteh.ru/UGFSvSPS/modul/BPSK/> (accessed: 15.03.2024). (In Russ.)
5. Four-position phase modulation (QPSK). URL: <https://digteh.ru/UGFSvSPS/modul/QPSK/> (accessed: 15.03.2024). (In Russ.)
6. Nikolaev B.I., Chingaeva A.M. Energy ratios at computer modelling of processes in the digital systems of information transmission. *Infokommunikacionnye tekhnologii*, 2006, vol. 4, no. 1, pp. 53–57. (In Russ.)
7. Kartashevsky V.G. *Processing of spatiotemporal signals in channels with memory*. Moskow: Radio i svyaz', 2000, 272 p. (In Russ.)

8. Kartashevsky V.G., Shatilov S.V. Processing of the PM-4 signals packet in the channel with memory. *Radiotekhnika*, 2011, vol. 65, no. 7, pp. 26–35. (In Russ.)
9. Konyaeva O.S. The MIMO system model in memory channel. *Infokommunikacionnye tekhnologii*, 2014, vol. 12, no. 3, pp. 32–36. (In Russ.)
10. Kartashevsky V.G., Konyaeva O.S., Semenov E.S. Reception «on the whole» for MIMO-system in channel with memory. *Uspekhi Sovremennoj Radioelektroniki*, 2015, no. 11, pp. 49–53. (In Russ.)
11. Kartashevsky V.G., Konyaeva O.S., Semenov E.S. Analysis performances of algorithms v-blast and suboptimal ml for the MIMO system. *Radiotekhnika*, 2017, no. 1, pp. 131–136. (In Russ.)

Received 20.03.2024

УДК 936.027.25

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕМОВ СИГНАЛОВ МИНИМАЛЬНОЙ ЧАСТОТНОЙ МАНИПУЛЯЦИИ

Тяжеев А.И.

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ

E-mail: a.tyagov@psuti.ru

В статье рассматриваются специфические особенности построения модемов сигналов минимальной частотной манипуляции по различным схемам с высокими показателями помехоустойчивости. Приводится анализ формирования сигналов минимальной частотной манипуляции, а также сигналов частотной модуляции, ортогональных в усиленном смысле, их количественные показатели и сравнительные характеристики. Описаны две схемы демодуляторов сигналов минимальной частотной манипуляции: когерентная и автокорреляционная, приведены их сравнительные характеристики. Описаны принципы работы этих схем демодуляторов с помощью временных диаграмм, сформулированы требования к генераторам опорных колебаний, входящих в состав когерентных демодуляторов, а также требования к сигналам минимальной частотной манипуляции, при которых обеспечивается наибольшая помехоустойчивость в автокорреляционных демодуляторах сигналов минимальной частотной манипуляции с бинарным квантованием сигналов.

Ключевые слова: минимальная частотная манипуляция, модулятор сигнала, демодулятор сигнала, помехоустойчивость, частотно-манипулированный сигнал, фазоманипулированный сигнал, бинарное квантование сигнала

Введение

В сотовых телефонах стандарта GSM для передачи сообщений от базовых станций до абонентских терминалов и в обратном направлении используется современный вид модуляции радиосигнала, который называют минимальной частотной манипуляцией (МЧМ). Этот же вид модуляции используется в беспроводных телефонах, работающих в стандарте DECT (Digital Enhanced Cordless Telecommunication), а также в ряде систем космической связи. В англоязычных публикациях этот вид модуляции называют так – Minimum Shift Keying (MSK). Первые публикации об этом виде модуляции появились в конце 70-х и начале 80-х годов прошлого века [1; 2]. В частности, в [1] автор этой статьи показал, что возможен такой вариант формирования частотно-манипулированного сигнала, который по помехоустойчивости такой же, как относительно фазоманипулированный сигнал (ОФМ) со скачками фазы на π . Чем же хорош этот вид модуляции, почему он по некоторым показателям лучше сигнала ОФМ и почему он нашел широкое применение в современных системах радиосвязи? Ответам на эти вопросы и посвящена данная статья.

Отличия сигналов частотной модуляции и минимальной частотной манипуляции

До появления сигналов МЧМ в радиосвязи широко применялись сигналы частотной модуляции (ЧМ). У сигнала ЧМ минимальной единицей времени при формировании сигнала является период колебаний, а у сигнала МЧМ – полупериод колебаний. Обычно у сигнала ЧМ за длительность посылки T укладывается целое число N_H периодов колебаний нижней частоты $T_H = 1 / f_H$ и на единицу большее число $N_G = N_H + 1$ периодов колебаний верхней частоты $T_G = 1 / f_G$:

$$T_H N_H = T,$$

$$T_G N_G = T_G (N_H + 1) = T.$$

Тогда

$$T_H N_H = T_G (N_H + 1).$$

Перейдем от периодов колебаний к частотам:

$$f_G N_H = f_H (N_H + 1),$$

откуда получим:

$$N_H (f_G - f_H) = f_H.$$

Отсюда разность частот:

$f_p = f_g - f_n = 2f \partial = f_n / N_n = 1/(T_n N_n) = 1/T = V = 2F_M$, где $f \partial = F_M$. Тогда индекс модуляции для сигнала ЧМ равен $B = f \partial / F_M = 1$.

Для сигнала МЧМ за длительность посылки T укладывается целое число N_n полупериодов колебаний нижней частоты $0,5T_n$ и на единицу большее число $N_g = N_n + 1$ полупериодов колебаний верхней частоты $0,5T_g$, т. е.

$$0,5T_n N_n = T \dots 0,5T_n N_g = 0,5T_n (N_n + 1) = T.$$

$$0,5T_n N_n = 0,5T_n (N_n + 1).$$

Перейдем от периодов колебаний к частотам:

$$f_g N_n = f_n (N_n + 1),$$

откуда получим:

$$N_n (f_g - f_n) = f_n.$$

Разнос частот:

$f_p = f_g - f_n = 2f \partial = f_n / N_n = 1/(T_n N_n) = 1/2T = V/2 = F_M$, тогда индекс модуляции для сигнала МЧМ $B = f_p / F_M = 0,5$, т. е. она в 2 раза меньше, чем у сигнала ЧМ.

Это первое отличие сигнала МЧМ от сигнала ЧМ. Второе отличие сигнала МЧМ от сигнала ЧМ состоит в том, что фаза этого сигнала при переходе от одной посылки к другой должна быть всегда непрерывной несмотря на то, что фаза сигнала МЧМ в конце посылки может быть равна либо 0 либо π (рисунок 2). Поэтому сигнал МЧМ в литературе часто называют сигналом с непрерывной фазой. Третье отличие сигнала МЧМ от сигнала ЧМ состоит в том, что при использовании ЧМ в канал передается один из двух возможных вариантов сигнала $\sin(2\pi f_n t)$ или $\sin(2\pi f_g t)$, а при МЧМ в канал передается один из четырех возможных вариантов сигнала: $(2\pi f_n t)$, $-(2\pi f_n t)$, $(2\pi f_g t)$ и $-(2\pi f_g t)$.

Можно также формировать сигналы ЧМ и МЧМ отрезками косинусоиды: для ЧМ $\cos(2\pi f_n t)$ или $\cos(2\pi f_g t)$, а для МЧМ $\cos(2\pi f_n t)$, $-\cos(2\pi f_n t)$, $\cos(2\pi f_g t)$ и $-(2\pi f_g t)$. В этом случае в конце посылки фаза сигнала может быть либо $\pi/2$ либо $-\pi/2$.

При обоих вариантах формирования сигналов ЧМ и МЧМ интеграл произведения сигналов посылок разных знаков $x_1(t)$ и $x_2(t)$ на интервале длительности посылок T для сигнала МЧМ равен нулю:

$$\int_0^T x_1(t)x_2(t)dt = 0. \quad (1)$$

Название сигналов МЧМ связано с минимальным значением индекса модуляции $B=0,5$, при котором еще обеспечивается равенство нулю интеграла (1), что означает ортогональность сигналов $x_1(t)$ и $x_2(t)$ от посылок разных знаков в сигнале МЧМ на интервале длительности посылки T .

Когерентный демодулятор сигналов МЧМ и особенности его работы

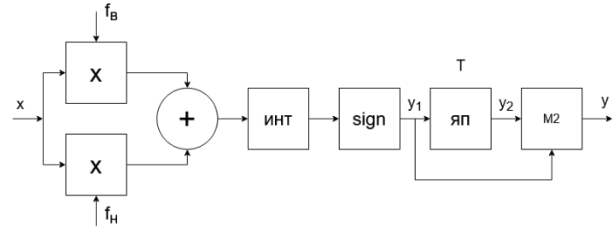


Рисунок 1. Структурная схема когерентного демодулятора сигналов МЧМ

Различные варианты построения модуляторов сигналов МЧМ описаны в [8; 9; 11], поэтому в этой статье они не рассматриваются. Здесь рассмотрим построение, принцип и особенности работы когерентных демодуляторов сигналов МЧМ. Известно, что наилучшую помехоустойчивость обеспечивают когерентные демодуляторы сигналов МЧМ [6]. Ниже приведена информация о схеме этого демодулятора (рисунок 1) и о принципе его работы (рисунок 2; рисунок 3). Состав схемы на рисунке 1: на входе 2 перемножителя, далее сумматор, интегратор, двухполярный ограничитель sign, ячейка памяти (ЯП) и узел (M2). На рисунке 1 не показаны генераторы опорных колебаний $x_{1on}(t)$ и $x_{2on}(t)$ с частотами f_g и f_n соответственно, показаны только выходы этих генераторов.

Рисунок 2 иллюстрирует работу изображенного на рисунке 1 демодулятора сигнала МЧМ с числами полупериодов колебаний принимаемых сигналов $N_n = 2$ и $N_g = 3$.

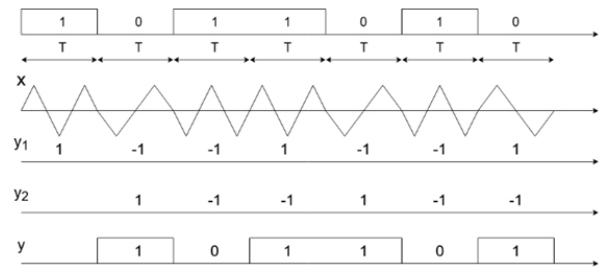


Рисунок 2. Иллюстрация работы демодулятора сигнала МЧМ с числами полупериодов колебаний принимаемых сигналов $N_n = 2$, $N_g = 3$

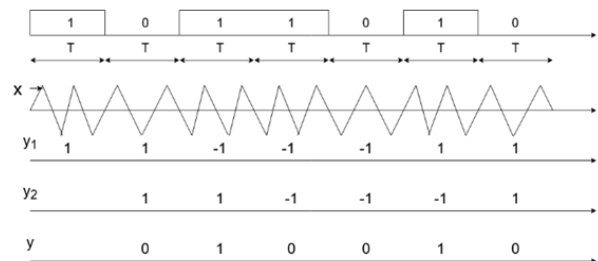


Рисунок 3. Иллюстрация работы демодулятора сигнала МЧМ с числами полупериодов колебаний принимаемых сигналов $N_n = 3$, $N_g = 4$

Рисунок 3 иллюстрирует работу демодулятора сигнала МЧМ с числами полупериодов $N_H = 3$ и $N_\theta = 4$ и с такой же последовательностью передаваемых посылок, как на рисунке 2.

На первой диаграмме рисунка 2 и рисунка 3 приведены передаваемые посылки, на второй диаграмме – сформированный из отрезков синусоиды сигнал МЧМ. Для простоты начертания синусоида представлена в виде треугольных сигналов, что не влияет на процесс работы демодулятора. На третьей диаграмме изображен сигнал y_1 на выходе блока sign, на четвертой сигнал y_2 – это задержанный в регистре на время T сигнал y_1 . Поясним, как формируется в демодуляторе сигнал y_1 . Если на вход демодулятора поступает сигнал $x_1(t)$ с частотой f_θ , то на вход интегратора будет поступать сигнал в виде:

$$x_1(t) \cdot x_{1on}(t) + x_1(t) \cdot x_{2on}(t).$$

Если на вход демодулятора поступает сигнал $x_2(t)$ с частотой f_H , то на вход интегратора будет поступать сигнал в виде:

$$x_2(t) \cdot x_{1on}(t) + x_2(t) \cdot x_{2on}(t).$$

При интегрировании этих сигналов интеграл от одного из этих слагаемых будет равен нулю в соответствии с формулой (1), а интеграл от другого слагаемого будет либо положительным, либо отрицательным, в зависимости от того, совпадают начальные фазы сигналов $x_1(t)$ и $x_{1on}(t)$ или $x_2(t)$ и $x_{2on}(t)$ или являются противоположными.

Сформулируем еще одно правило для построения когерентного демодулятора сигналов МЧМ: в опорном генераторе с четным числом N_H или N_θ фаза колебаний в начале каждой посылки равна нулю, а в опорном генераторе с нечетным числом N_H или N_θ она должна чередоваться: либо ноль, либо π . Чтобы обеспечить это условие, надо предварительно перемножить колебания этого генератора на меандр с длительностью посылок T с чередующимися значениями $+1$ и -1 . Тогда колебания опорных генераторов $x_{1on}(t)$ и $x_{2on}(t)$ в начале каждой принимаемой посылки всегда будут равны нулю. С учетом этого обстоятельства и формулы (1) формируется сигнал определенного знака на выходе интегратора и соответствующий ему по знаку сигнал y_1 на выходе блока sign. Задержка сигнала в интеграторе на время T для упрощения рисунков не показана. На выходе блока M2 формируется выходной сигнал в результате сложения по модулю 2 сигналов y_1 и y_2 . Особенностью когерентного демодулятора сигналов МЧМ является то, что при нечетном числе N_H на выходе узла M2 формируется инвертированные передаваемые посылки (рисунок 3), поэтому при нечетном числе N_H надо на выходе узла M2 включить инвертор (сигнал $y_{вых}$ на рисунке 3).

Если для детектирования сигналов МЧМ применять частотные детекторы, в которых не учитываются начальные фазы сигналов $x_1(t)$ и $x_2(t)$, например, фильтровые демодуляторы или демодуляторы на основе измерения периодов входного сигнала, то помехоустойчивость у этих демодуляторов будет хуже, чем у когерентных демодуляторов сигналов МЧМ. Но схема когерентных демодуляторов сложнее, т.к. в них нужны генераторы опорных колебаний $x_{1on}(t)$ и $x_{2on}(t)$ частот f_H и f_θ , в которых необходимо обеспечить синхронность и синфазность колебаний опорных генераторов с сигналами $x_1(t)$ и $x_2(t)$. Способы синхронизации частоты и фазы цифровых опорных генераторов подробно описаны в работах [7; 8].

Автокорреляционный демодулятор сигналов МЧМ с бинарным квантованием сигнала

Автокорреляционные аналоговые и цифровые демодуляторы лишь незначительно уступают по помехоустойчивости описанным выше когерентным демодуляторам, но значительно проще в реализации [1; 6]. На рисунке 4 приведена схема автокорреляционного цифрового демодулятора сигналов МЧМ. Этот демодулятор был впервые описан автором данной статьи в [1], где была доказана его высокая помехоустойчивость при детектировании сигнала МЧМ определенного вида.

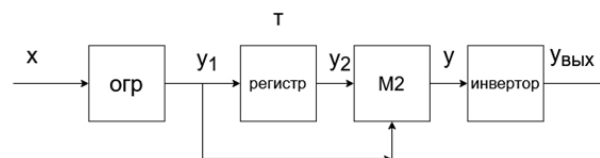


Рисунок 4. Структурная схема цифрового автокорреляционного демодулятора сигналов МЧМ с бинарным квантованием сигнала

Этот демодулятор содержит ограничитель (ОГР) на входе, регистр на D-триггерах, узел M2 и инвертор на выходе. Определим необходимую задержку сигнала в регистре T_3 при детектировании сигналов ЧМ и МЧМ. Наибольшая помехоустойчивость в автокорреляционном демодуляторе при детектировании сигналов ЧМ и МЧМ достигается при условии, когда набег фазы сигналов с частотами f_H и f_θ в регистре кратен π и отличается на π . В этом случае разница в уровнях сигналов на частотах f_H и f_θ на выходе узла M2 будет максимальной [1]. Математически это условие набег фаз в регистре запишем в виде системы из двух уравнений:

$$2\pi \cdot f_H \cdot T_3 = n \cdot \pi,$$

$$2\pi \cdot f_\theta \cdot T_3 = (n+1)\pi,$$

где $n=1, 2, 3, \dots$

Решим эту систему уравнений относительно T_3 и получим:

$$T_3 = 1 / (2(f_g - f_n))$$

В [1] показано, что при изменении частоты входного сигнала смена знака сигнала на выходе узла М2 сопровождается дроблениями. Эти дробления снижают помехоустойчивость демодулятора, так как посылки на его выходе размываются от этих дроблений. Длительность импульсов дробления изменяется по арифметической прогрессии на величину разности $0,5(T_n - T_g)$, а число этих импульсов дробления равно $m_1 = f_n / (f_g - f_n)$. Тогда суммарная длительность импульсов дробления как сумма членов арифметической прогрессии будет равна:

$$T_c = 0,25(T_n - T_g)(m_2 - 1)m_2, \quad (2)$$

где $m_2 = 0,5m_1$ при четном m_1 , $m_2 = 0,5(m_1 - 1)$ при нечетном m_1 .

Перейдем в (2) от периодов к частотам и получим:

$$T_c = \frac{2f_n - f_g}{16f_n f_p}, \quad (3)$$

при нечетном m_1 :

$$T_c = \frac{2f_g - f_n}{16f_g f_p}, \quad (4)$$

при четном m_1 , где $f_p = f_i - f$.

Из формулы (3) следует важный практический вывод, что при выполнении условия:

$$f_g = 2f_n \quad (5)$$

величина $T_c = 0$. Следовательно, при выполнении полученного условия (5) дробления посылок на выходе узла М2 при изменении частоты сигнала с f_n на f_g и обратно отсутствуют, благодаря чему дроблений в посылках на выходе узла М2 не наблюдается, следовательно, будет обеспечиваться наилучшая помехоустойчивость сигнала МЧМ в демодуляторе (рисунок 4). Из условия (5) для сигнала МЧМ вытекают следующие необходимые соотношения:

$$N_n = 1, N_g = 2, T_3 = 0,5 T_n = T, T_g = T, T_n = 2T. \quad (6)$$

Рисунок 5 иллюстрирует работу демодулятора сигнала МЧМ с бинарным квантованием сигнала, причем сигнал МЧМ удовлетворяет приведенным выше условиям и соотношениям (5) и (6).

На первой диаграмме показаны передаваемые посылки, на второй диаграмме показан сигнал МЧМ, удовлетворяющий условиям (5) и (6), на третьей и четвертой диаграммах показаны сигналы на выходах ОГР и регистра соответственно, на пятой диаграмме показан сигнал на выходе узла М2, а на шестой диаграмме показан сигнал на выходе ин-

вертора увых. Из этой диаграммы следует, что этот выходной сигнал не содержит дроблений и совпадает с передаваемыми посылками.

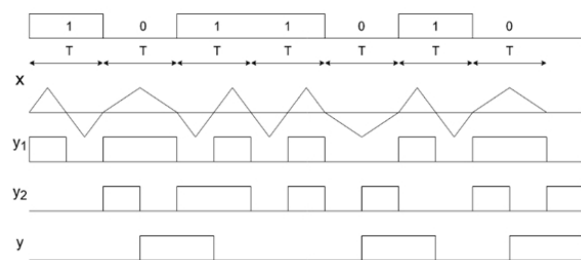


Рисунок 5. Временные диаграммы, поясняющие работу цифрового демодулятора сигнала МЧМ с бинарным квантованием сигнала при $N_n = 1$, $N_g = 2$

Заключение

Из приведенного в статье материала следует, что сигналы МЧМ обладают наилучшей помехоустойчивостью, сопоставимой с помехоустойчивостью противоположных сигналов. Кроме того, они обладают еще двумя важными преимуществами. Первое – это постоянная амплитуда сигнала, а второе – это меньшая ширина спектра, чем у противоположных сигналов при одинаковой скорости передачи сообщений. Благодаря этим преимуществам сигналы МЧМ практически вытеснили противоположные сигналы из аппаратуры связи. Благодаря первому преимуществу передатчики сигналов МЧМ работают с высоким коэффициентом полезного действия в режиме класса С, а благодаря второму преимуществу экономится полоса частот при передаче этого сигнала по каналам связи. При использовании сигнала МЧМ при $N_n = 1$ и $N_g = 2$ возможно построение демодуляторов с бинарным квантованием сигнала, что существенно упрощает их реализацию на цифровой элементной базе, т.к. при этом не нужны сложные и дорогие аналого-цифровые преобразователи и микропроцессоры, как, например, в бесшнуровых телефонах стандарта DECT, где вместо аналого-цифрового преобразователя используется бинарный квантователь на компараторе, а частота дискретизации сигнала равна 32 кГц.

Литература

1. Тяжев А.И. О помехоустойчивости автокорреляционного цифрового демодулятора сигналов ЧТ // Радиотехника. 1980. Т. 35, № 10. С. 5–9.
2. Спилкер Дж. Цифровая спутниковая связь / под ред. В.В. Маркова; пер. с англ. М.: Связь, 1979. 592 с.
3. Диденко М.Г., Коновалов Г.В. Энергетические характеристики радиосигналов при методах манипуляции с минимальным сдвигом // Ради-

- отехника. 1982. Т. 37, № 7. С. 3–7.
4. Крохин В.В., Беляев В.Ю., Гореликов А.В. Методы модуляции и приема цифровых частотно-манипулированных сигналов с непрерывной фазой // Зарубежная радиоэлектроника. 1982. № 4. С. 58–72.
5. Балашов В.А., Воробийченко П.П., Ляховецкий Л.М. Системы передачи ортогональными гармоническими сигналами. М.: Экотренз, 2012. 226 с.
6. Проксис Дж. Цифровая связь / под ред. Д.Д. Кловского; пер. с англ. М.: Радио и связь, 2000. 798 с.
7. Тяжев А.И. Оптимизация цифровых детекторов в приемниках по минимуму вычислительных затрат. Самара: Поволжский институт информатики, радиотехники и связи, 1994. 256 с.
8. Макаров С.Б., Цикин И.А. Передача дискретных сообщений по радиоканалам с ограниченной полосой пропускания. М.: Радио и связь, 1988. 304 с.
9. Иванова В.Г., Тяжев А.И. Цифровая обработка сигналов и сигнальные процессоры. Самара: ОФОРТ, 2008. 264 с.
10. Тяжев А.И. Алгоритм расчета коэффициентов рекурсивного цифрового фильтра второго порядка по заданным требованиям к АЧХ с применением точных расчетных формул // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2018. Т. 21, № 4. С. 54–57.
11. Тяжев А.И. Цифровые модемы сигналов МЧМ и их характеристики // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2023. Т. 26, № 3. С. 106–115.

Получено 10.04.2024

Тяжев Анатолий Иванович, д.т.н., профессор кафедры радиоэлектронных систем Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики. 443010, Российская Федерация, г. Самара, ул. Льва Толстого, 23. Тел. +7 846 339-11-88. E-mail: a.tyagev@psuti.ru

STRUCTURE FEATURES OF MINIMUM FREQUENCY SHIFT KEYING SIGNAL MODEMS

Tyazhev A.I.

*Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russian Federation
E-mail: a.tyagev@psuti.ru*

The article discusses specific features of constructing modems for minimum frequency shift keying signals using various schemes with high noise immunity levels. An analysis of the formation of these signals and frequency modulation signals, which are orthogonal if enhanced, is provided, including quantitative indicators and comparative characteristics. Two schemes of minimum frequency shift keying signal demodulators (coherent and autocorrelation) are examined, including their comparative features. Operation principles of these demodulator circuits with the use of timing diagrams are described, requirements for the reference oscillator generators included in coherent demodulators are formulated, as well as the requirements for minimum frequency shift keying signals, which ensure the greatest noise immunity in autocorrelation demodulators of minimum frequency shift keying signals with binary signals quantization.

Keywords: *minimum frequency shift keying, signal modulator, signal demodulator, noise immunity, frequency-shift keyed signal, phase-shift keyed signal, binary signal quantization*

DOI: 10.18469/ikt.2023.21.4.08

Tyazhev Anatoly Ivanovich, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 23, L. Tolstoy Street, Samara, 443010, Russian Federation; Professor of Radioelectronic Systems Department, Doctor of Technical Sciences. Tel. +7 846 339-11-88. E-mail: a.tyagev@psuti.ru

References

1. Tyazhev A.I. On the noise immunity of an autocorrelation digital demodulator for CT signals. *Radiotekhnika*, 1980, vol. 35, no. 10, pp. 5–9. (In Russ.)
2. Spilker J. *Digital satellite communications*. Ed by V.V. Markova. Transl. From English. Moscow: Svyaz', 1979, 592 p. (In Russ.)
3. Didenko M.G., Konovalov G.V. Energy characteristics of radio signals using manipulation methods with minimal shift. *Radiotekhnika*, 1982, vol. 37, no. 7, pp. 3–7. (In Russ.)

4. Krokhin V.V., Belyaev V.Yu., Gorelikov A.V. Methods of modulation and reception of digital frequency-shift keyed signals with continuous phase. *Zarubezhnaya radioelektronika*, 1982, no. 4, pp. 58–72. (In Russ.)
5. Balashov V.A., Vorobienko P.P., Lyakhovetsky L.M. *Transmission systems with orthogonal harmonic signals*. Moscow: Ekotrenz, 2012, 226 p. (In Russ.)
6. Praxis J. *Digital communication*. Ed by D.D. Klovsky. Transl. From English. Moscow: Radio i svyaz', 2000, 798 p. (In Russ.)
7. Tyazhev A.I. *Optimization of digital detectors in receivers to minimize computational costs*. Samara: Povolzhskij institut informatiki, radiotekhniki i svyazi, 1994, 256 p. (In Russ.)
8. Makarov S.B., Tsikin I.A. *Transmission of discrete messages over radio channels with limited bandwidth*. Moscow: Radio i svyaz', 1988, 304 p. (In Russ.)
9. Ivanova V.G., Tyazhev A.I. *Digital signal processing and signal processors*. Samara: OFORT, 2008, 264 p. (In Russ.)
10. Tyazhev A.I. Algorithm for calculation of recursive digital filter coefficients of the second order according to the specific requirements for the access with the application accurate design forms. *Physics of Wave Processes and Radio Engineering Systems*, 2018, vol. 21, no. 4, pp. 54–57. (In Russ.)
11. Tyazhev A.I. Digital modems of minimum frequency shift keying signals and their characteristics. *Physics of Wave Processes and Radio Engineering Systems*, 2023, vol. 26, no. 3, pp. 106–115. (In Russ.)

Received 10.04.2024

НОВЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 004.89

РАЗРАБОТКА ОБУЧАЮЩЕЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ АНАЛИТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ ХАИ

Пальмов С.В.^{1,2}, Диязитдинова А.А.¹

¹ Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ

² Самарский государственный технический университет, Самара, РФ

E-mail: s.palmov@psuti.ru, a.diyazitdinova@psuti.ru

Интеллектуальный анализ данных является востребованной услугой. Многие отечественные вузы занимаются подготовкой специалистов в этой области. Однако запросы потребителей возрастают, что ведет к повышению требований к формируемым математическими моделями результатам. Клиент хочет быть уверенным в качестве получаемых рекомендаций. Один из способов достичь этого – использовать технологию объяснимого искусственного интеллекта (ХАИ). Сложившаяся в мире ситуация накладывает серьезные ограничения на использование зарубежного программного обеспечения, а отечественные аналитические системы, потенциально доступные для вузов, не содержат среди имеющихся в них функций модуля ХАИ. Выходом является самостоятельная разработка такой системы. Авторами создан программный продукт, позволяющий обучать математические модели трех видов, для прогнозов каждой из которых может быть сгенерировано объяснение в текстовом формате. Была проведена серия экспериментов, подтвердивших работоспособность всех элементов созданного продукта, а также возможность его применения в учебном процессе вуза.

Ключевые слова: искусственный интеллект, ХАИ, высшее образование, Python, классификация, метод опорных векторов, стохастический градиентный спуск, гауссовский процесс

Введение

Направление, связанное с применением методов искусственного интеллекта (ИИ), в настоящее время является очень актуальным. Как следствие, в подавляющем большинстве вузов РФ преподают дисциплины, связанные с упомянутой областью. При этом для студентов часто используют готовые

программные решения, реализующие «умные» алгоритмы, а не разрабатывают последние самостоятельно. В условиях ограничений на использование зарубежных аналитических систем, встает вопрос об импортозамещении. Существующие отечественные продукты способны закрыть потребности, но только до определенной степени (таблица 1). С развитием возможностей указанных методов,

возрастают требования к навыкам студентов. Уже недостаточно просто уметь строить математические модели, посредством которых выполняется обработка данных. Требуются компетенции, позволяющие создавать приложения, поясняющие пользователю (лицу, принимающему решения) сформированные результаты. Технология, отвечающая за нахождение подобных решений, называется ХАИ (объяснимый искусственный интеллект) [6]. Если изучить упомянутые выше отечественные разработки с данной точки зрения, то невозможность их применения для решения озвученной задачи станет очевидной: ни одна из них не реализует объяснимый ИИ, а, кроме этого, все наиболее совершенные продукты являются проприетарными и предназначены для крупного и среднего бизнеса.

Таблица 1. Примеры и краткая характеристика отечественных аналитических платформ

Название продукта	Особенности
Loginom [1]	Бесплатная версия есть, ХАИ отсутствует
PolyAnalyst [2]	Бесплатной версии нет, ХАИ отсутствует
Deductor [3]	Бесплатная версия есть, ХАИ отсутствует, устаревшая
Data Plexus [4]	Бесплатной версии нет, ХАИ отсутствует
Polymatica [5]	Бесплатной версии нет, ХАИ отсутствует, ориентирована на крупный и средний бизнес

Предлагаемое решение

Выход заключается в самостоятельной разработке программного обеспечения (ПО) с ХАИ.

Рассматриваемая аналитическая система включает реализацию трех алгоритмов ИИ, которые могут выполнять обработку табличных данных в разрезе классификации содержащихся в них объектов. Кроме этого, в ней присутствует функционал ХАИ, позволяющий выполнять «объяснение» прогноза классовой принадлежности для одиночных объектов.

Система была написана на языке Python, что позволяет запускать программу на разных операционных системах, в том числе семейства Linux; это важно в контексте реализации мероприятий по импортозамещению.

ХАИ может быть реализован разными способами. В данной работе использовалась библиотека LIME [7].

Предлагаемое ПО предполагается использовать при проведении лабораторных работ в учебных курсах Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики, посвященных изучению методов ИИ.

В программе доступно создание классификаторов на базе следующих алгоритмов (применена библиотека scikit-learn): опорных векторов (SVM) [8], стохастического градиентного спуска (SGD) [9] и гауссовского процесса [10].

Описание созданного программного продукта

Пользовательский интерфейс аналитической системы содержит пять вкладок. Первые три (рисунки 1–3, таблица 2–4) предназначены для задания значений гиперпараметров перечисленных выше математических моделей. Следующая служит для выбора режима работы классификаторов (проверка на данных с известными значениями целевого показателя, или прогнозирование последних). Пятая предназначена для формирования объяснений. На ней размещено поле для ввода значений независимых переменных, для которых необходимо сформировать объяснение. Скриншоты двух крайних вкладок не приведены ввиду экономии места. Результаты проверки и прогнозирования выводятся в текстовый файл; объяснения выводятся в консоль.

Таблица 2. Элементы интерфейса. SVM

Название	Пояснения
Регуляризация	Параметр регуляризации. Чем значение выше, тем меньше штраф
Ядро	Задаёт тип ядерной функции
Степень	Определяет степень в случае использования полиномиальной («poly») ядерной функции
Гамма	Используется для определения влияния одного обучающего примера на другие. Чем больше значение, тем сильнее ближайшие объекты будут влиять на границу принятия решений
coef0	Независимый член ядерной функции (для случаев «poly» и «sigmoid»)
Сжатие	Если активно, игнорирует часть опорных векторов, находящихся на достаточно большом расстоянии от гиперплоскости; сокращает время обучения модели, сохраняя высокий уровень качества
Вероятность	Позволяет учесть неопределенность в данных и более точно оценить вероятность принятия правильного решения
Останов	Определяет критерий остановки обучения модели. Когда разница между значениями функции потерь становится меньше или равна установленному порогу этого гиперпараметра, обучение модели останавливается; считается, что достигнута достаточная точность
Макс. число итераций	«-1» – число итераций без ограничений
Форма решающей функции	Позволяет задать форму решающей функции

Таблица 3. Элементы интерфейса. SGD

Название	Пояснения
Функция потерь	Используется для оценки качества обучаемой модели
Штраф	Способ расчета штрафа модели
Альфа	Параметр регуляризации
L1-коэффициент	Управляет регуляризацией модели (для ситуации «Штраф» = «elasticnet»)
у-перехват	Определяет, будет ли автоматически добавляться («Да») дополнительный признак к данным перед обучением; это сделает возможным учесть сдвиг (bias) в модели. Он позволяет учитывать среднее значение целевой переменной («у»), не зависящее от входных признаков. Другими словами, включение сдвига в модель позволяет принимать во внимание возможное отклонение прогнозов от реальных значений на константное значение
Макс. количество итераций	Предельное число циклов обучения модели
Останов	Определяет критерий остановки обучения модели. Когда разница между значениями функции потерь становится меньше или равна установленному порогу этого гиперпараметра, обучение модели останавливается; считается, что достигнута достаточная точность
Перемешать	Включает перемешивание тренировочных данных для каждого цикла обучения модели
Выводить подробную статистику	Настройка уровня журналирования
Эпсилон	Используется для предотвращения деления на ноль, или очень малое число в процессе вычисления градиента; повышает устойчивость алгоритма, особенно при вычислении шага обновления весов модели
Рандомизировать	Настройка начального значения генератора случайных чисел при обучении модели
Скорость обучения	Задаёт частоту обновления весовых коэффициентов
Начальная скорость обучения	Позволяет задать значение начальной скорости обучения
Показатель для скорости обучения	Степень, с которой динамически изменяется скорость обучения в процессе оптимизации; влияет на стабильность сходимости

Название	Пояснения
Ранняя остановка	Используется для предотвращения переобучения модели; останавливает процесс при выполнении некоторого условия
Набор для ранней остановки	Доля обучающих данных, используемая функцией ранней остановки
Число итераций без изменений	При активной ранней остановке завершает процесс обучения через указанное число шагов, если качество модели не увеличивается
Вычислять средние веса	Позволяет задать веса классов

Таблица 4. Элементы интерфейса. Гауссовский процесс

Название	Пояснения
Ковариационная функция	Задаёт тип используемой в модели ковариационной функции
Оптимизатор	Определяет инструмент для оптимизации параметров ковариационной функции
Число перезапусков оптимизатора	Количество перезапусков оптимизатора для нахождения параметров ядра (ковариационной функции), которые максимизируют логарифмическое отношение правдоподобия. Первый запуск оптимизатора выполняется с начальными параметрами ядра, остальные (если есть) с параметрами theta, выбранными случайно в логарифмической шкале из допустимых значений параметров theta
Макс. число итераций	Максимальное количество итераций в методе Ньютона для оценки апостериорных вероятностей во время прогнозирования. Уменьшение этого значения сокращает время вычислений, но может приводить к менее точным результатам
Хранить копию данных	Позволяет ускорить построение модели для схожих задач
Рандомизировать	Настройка начального значения генератора случайных чисел при обучении модели
Обработка мультиклассовости	Определяет, как обрабатываются задачи многоклассовой классификации
Параллельность	Задаёт число используемых процессорных ядер.

Объяснимый классификатор

Главное меню Объяснения

Настройка модели SGD Настройка модели GPC Настройка модели SVM Задание режима работы Режим объяснения

Функция потерь: Эпсилон:

Штраф: Рандомизировать:

Альфа: Скорость обучения:

L1-коэффициент: Начальная скорость обучения:

у-перехват: Показатель для скорости обучения:

Макс. кол-во итераций: Ранняя остановка:

Останов: Набор для ранней остановки:

Перемешать: Число итераций без изменений:

Выводить подробную статистику: Вычислять средние веса:

Рисунок 1. Вкладка для настройки гиперпараметров SGD

Объяснимый классификатор

Главное меню Объяснения

Настройка модели SGD Настройка модели GPC Настройка модели SVM Задание режима работы Режим объяснения

Ковариационная функция: Хранить копию данных:

Оптимизатор: Рандомизировать:

Число перезапусков оптимизатора: Обработка многоклассовости:

Макс. число итераций: Параллельность:

Ускорить построение модели:

Рисунок 2. Вкладка для настройки гиперпараметров GPC

Объяснимый классификатор

Главное меню Объяснения

Настройка модели SGD Настройка модели GPC Настройка модели SVM Задание режима работы Режим объяснения

Регуляризация: Сжатие:

Ядро: Вероятность:

Степень: Останов:

Гамма: Макс. число итераций:

coef0: Форма решающей функции:

Рисунок 3 – Вкладка для настройки гиперпараметров SVM

Также присутствует два меню (рисунок 4, 5). Первое позволяет загрузить данные для обучения, создать соответствующий классификатор, сохранить (или загрузить существующий из файла) и

применить классификатор. Второе предназначено для формирования объяснений посредством построения определенной математической модели.

Исследование возможностей разработанного программного обеспечения

Была проведена серия экспериментов, направленная на демонстрацию возможностей рассматриваемого ПО. Ниже приведено краткое описание каждого эксперимента, его входные данные и полученные результаты.

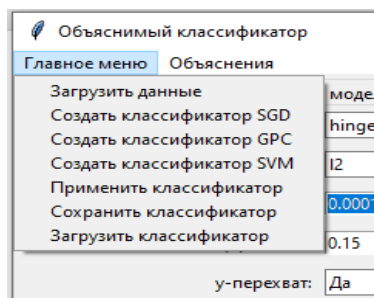


Рисунок 4. Главное меню

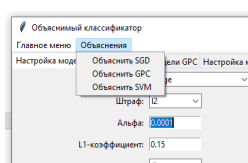


Рисунок 5. Меню «Объяснения»

Первый эксперимент

На основе набора «ирисы Фишера» создано десять ($D1 \div D10$) датасетов (150 объектов в каждом); использовалась случайная выборка с замещением. $D1$ – обучающее множество, остальные – тестовые. Был выполнен прогон по всем моделям, построенным при стандартных (рисунок 1–3) значениях гиперпараметров. Результаты (средние вероятности корректного распознавания объектов) представлены в таблице 5.

Таблица 5. Результаты для SGD, GPC и SVM

Набор	$\bar{p}$		
	SGD	GPC	SVM
$D2 \div D10$	0.673	0.973	

Второй эксперимент

SGD показал заметно более низкий результат по сравнению с двумя другими алгоритмами. Попробуем увеличить эффективность модели, манипулируя значениями наиболее важных гиперпараметров. Для указанного алгоритма это – скорость обучения, сила регуляризации, размер пакета и количество итераций.

В результате было установлено, что достаточно изменить значения «Штраф» на «1», а «Макс. кол-во итераций» и «Число итераций без изменений» на «1000», чтобы достичь значения $\bar{p} = 0.98$.

Третий эксперимент

Он заключался в демонстрации работы модуля объяснений. Использовался модифицированный $D1$. Из него были исключены последние три объекта (таблица 6), которые использовались как исходные данные для формирования объяснений (каждая запись имеет отличную от других классовую принадлежность). Для всех объектов формировался прогноз посредством рассмотренных классификаторов и выводилось его объяснение.

Таблица 6. «Объясняемые» объекты

sepal length	sepal width	petal length	petal width	class
7.2	3.2	6.0	1.8	2
4.9	3.0	1.4	0.2	0
5.6	3.0	4.5	1.5	1

Далее, для экономии места, приведены только один прогноз и соответствующее ему объяснение. Качество во всех девяти случаях разнилось, но цель данного эксперимента состояла лишь в демонстрации «пояснительных» возможностей программы.

Объяснение SGD для объекта (7.2, 3.2, 6.0, 1.8):

(‘sepal length > 6.40’, 0.159),
(‘1.30 < petal width <= 1.80’, -0.140),
(‘petal length > 5.10’, 0.046),
(‘3.00 < sepal width <= 3.30’, -0.030)

Объект принадлежит к классу: 2

Вероятность принадлежности объекта к определённому классу:

[$1.2 \cdot 10^{-66}$, $7.83 \cdot 10^{-36}$, 1.0]

Поясним структуру выведенного результата.

Моделью был сформирован прогноз значения целевого показателя для первого объекта из таблицы 6. Он оказался верным («2»). В качестве пояснения указанного результата предлагается логическое правило. Представим его в более наглядном виде: ЕСЛИ ‘sepal length > 6.40’ И ‘1.30 < petal width <= 1.80’ И ‘petal length > 5.10’ И ‘3.00 < sepal width <= 3.30’ ТО ‘class = 2’.

Если изучить данное правило, то второй и четвертый его элементы не будут соответствовать значениям независимой переменной объекта. Они демонстрируют, что запись может принадлежать другим классам. На это указывают отрицательные веса («-0.140» и «-0.030») соответствующих элементов правила. Учитывая низкие вероятности принадлежности объекта к другим классам, второй и четвертый элементы приведенного правила можно, в данном случае, исключить из рассмотрения. Таким образом, значимыми при определении классовой принадлежности первой записи из указанной таблицы являются только две переменные: «sepal length» и «petal length».

Выводы

Разработанная программа продемонстрировала возможности, которые делают оправданным ее применение для решения упомянутой выше задачи:

- создание различных классификаторов;
- повышение качества формируемых моделей посредством манипулирования значениями их гиперпараметров;
- генерация прогнозов для новых данных;
- формирование объяснений для одиночных объектов.

Результаты работы последней из перечисленных функций требуют дополнительных пояснений. В эксперименте №3 авторами специально был предоставлен подобный пример, содержащий отрицательные веса. Однако это не уменьшает ценности данной функции, поскольку она позволяет «заглянуть внутрь» черного ящика нелинейной модели и получить хотя бы некоторое представление о знаниях, на которых основывается ее работа.

Литература

1. Loginom. Возможности. URL: <https://loginom.ru/platform#components> (дата обращения: 23.03.2024).
2. Система self service аналитики данных PolyAnalyst. URL: <https://www.megaputer.ru/produkti> (дата обращения: 23.03.2024).
3. Deductor. URL: <https://basegroup.ru/deductor/description> (дата обращения: 23.03.2024).
4. Data Plexus. URL: <https://data-plexus.ru/> (дата обращения: 23.03.2024).
5. Машинное обучение как часть корпоративной ДНК. URL: <https://www.polymatica.ru/polymatica-ml/> (дата обращения: 23.03.2024).
6. Пальмов С.В. Повышение эффективности методов искусственного интеллекта посредством технологии XAI // Наука, инновации, образование: актуальные вопросы XXI века: материалы IX Международной научно-практической конференции. Пенза, 2024. С. 31–34.
7. Local Interpretable Model-agnostic Explanations (LIME). URL: <https://ema.drwhy.ai/LIME.html> (дата обращения: 23.03.2024).
8. Theodoros E., Massimiliano P. Support Vector Machines: Theory and Applications // Machine Learning and Its Applications. 2001. Vol. 2049. P. 249–257. DOI: 10.1007/3-540-44673-7_12
9. Tian Y., Zhang Y., Zhang H. Recent Advances in Stochastic Gradient Descent in Deep Learning // Mathematics. 2023. Vol. 11, no. 3. P. 682.
10. Ebdem M. Gaussian Processes for Regression and Classification: A Quick Introduction. 2015. URL: https://www.researchgate.net/publication/276296816_Gaussian_Processes_for_Regression_and_Classification_A_Quick_Introduction (дата обращения: 21.03.2024).

Получено 26.03.2024

Пальмов Сергей Вадимович, к.т.н., доцент, доцент кафедры информационных систем и технологий (ИСТ) Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики. 443090, Российская Федерация, г. Самара, Московское шоссе, 77; доцент кафедры информационных технологий Самарского государственного технического университета. 443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244. Тел. +7 927 706-61-21. E-mail: s.palmov@psuti.ru

Диязитдинова Альфия Асхатовна, ст. преподаватель кафедры ИСТ ПГУТИ. 443090, Российская Федерация, г. Самара, Московское шоссе, 77. Тел. +7 937 795-01-95. E-mail: a.diyazitdinova@psuti.ru

DEVELOPMENT OF AN EDUCATIONAL INTELLIGENT ANALYTICAL SYSTEM USING XAI TECHNOLOGY

Palmov S.V.^{1,2}, Diyazitdinova A.A.¹

¹ *Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russian Federation*

² *Samara State Technical University, Samara, Russian Federation*

E-mail: s.palmov@psuti.ru, a.diyazitdinova@psuti.ru

Data mining is recognized as highly sought-after service. Many universities are involved in training specialists in this field. However, consumer demands are increasing, resulting in higher requirements for the mathematical models used in this regard. Clients need to be sure in the quality level of the recommendations they get. One method to achieve this is provided with the use of Explainable Artificial Intelligence (XAI) technology. The current situation worldwide poses limitations on the use of foreign software, and domestic analytical systems available to universities may not have XAI module among their functions. The solution is to develop such system independently. The authors developed a software product that enables

training of three types of mathematical models, each capable of generating an explanation in textual format for its forecasts. A series of experiments was conducted in order to confirm functionality of all elements of the created product, as well as its potential to be used training processes in higher education system.

Keywords: artificial intelligence, XAI, higher education, Python, classification, support vector machine, stochastic gradient descent, gaussian process

DOI: 10.18469/ikt.2023.21.4.09

Palmov Sergey Vadimovich, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 77, Moscovskoye shosse, Samara, 443090, Russian Federation; Associated Professor of Information Systems and Technologies Department, PhD in Technical Science. Samara State Technical University, 244, Molodogvardeyskaya Street, Samara, 443100, Russian Federation; Associated Professor of Technologies Department. Tel. +7 927 706-61-21. E-mail: s.palmov@psuti.ru

Diyazitdinova Alfiya Askhatovna, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 77, Moscovskoye shosse, Samara, 443090, Russian Federation; Senior Teacher of Information Systems and Technologies Department. Tel. +7 937 795-01-95. E-mail: a.diyazitdinova@psuti.ru

References

1. Loginom. Opportunities. URL: <https://loginom.ru/platform#components> (accessed: 23.03.2024). (In Russ.)
2. Self service data analytics system PolyAnalyst. URL: <https://www.megaputer.ru/produkti> (accessed: 23.03.2024). (In Russ.)
3. Deductor. URL: <https://basegroup.ru/deductor/description> (accessed: 23.03.2024). (In Russ.)
4. Data Plexus. URL: <https://data-plexus.ru/> (accessed: 23.03.2024). (In Russ.)
5. Machine learning as part of corporate DNK. URL: <https://www.polymatica.ru/polymatica-ml/> (accessed: 23.03.2024). (In Russ.)
6. Palmov S.V. Increasing the efficiency of artificial intelligence methods through XAI technology. *Nauka, innovacii, obrazovanie: aktual'nye voprosy XXI veka: materialy IX Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii*. Penza, 2024, pp. 31–34. (In Russ.)
7. Local Interpretable Model-agnostic Explanations (LIME). URL: <https://ema.drwhy.ai/LIME.html> (accessed: 22.03.2024).
8. Theodoros E., Massimiliano P. Support Vector Machines: Theory and Applications. *Machine Learning and Its Applications*, 2001, vol. 2049, pp. 249–257. DOI: 10.1007/3-540-44673-7_12
9. Tian Y., Zhang Y., Zhang H. Recent Advances in Stochastic Gradient Descent in Deep Learning. *Mathematics*, 2023, vol. 11, no. 3, pp. 682.
10. Ebden M. Gaussian Processes for Regression and Classification: A Quick Introduction. 2015. URL: https://www.researchgate.net/publication/276296816_Gaussian_Processes_for_Regression_and_Classification_A_Quick_Introduction (accessed: 21.03.2024).

Received 26.03.2024

УДК 004.9

WEB-ПРИЛОЖЕНИЕ «ЭЛЕКТРОННЫЙ ЧИТАТЕЛЬСКИЙ ДНЕВНИК» С ЭЛЕМЕНТАМИ AGILE-ТЕХНОЛОГИИ

Диязитдинова А.Р., Сальникова Д.А.

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ

E-mail: dijazitdinova@mail.ru

В работе рассмотрен проект реализации электронного читательского дневника с использованием элементов Agile-технологий для формирования читательской компетенции у учащихся начальной школы. Современные ученики относятся к поколению, которое родилось и развивается в новой информационной среде: они гораздо быстрее взрослых осваивают различные информационные и программные продукты (всевозможные гаджеты, планшеты, мобильные устройства и пр.). К негативным аспектам такого положения вещей специалисты относят нежелание учеников читать.

Одним из инструментов, который целесообразно использовать для стимулирования читательской активности, можно назвать применение в учебном процессе технологии читательского дневника. Классический читательский дневник представляет собой своеобразный отчет о прочитанных произведениях. При этом целью ведения читательского дневника является, прежде всего, формирование навыков осмысления и критического анализа прочитанной информации. Предлагаемый программный продукт ориентирован на учащихся начальной школы (возраст 7–10 лет). В младшем школьном возрасте закладываются навыки самостоятельного чтения, что способствует развитию познавательных интересов школьников, обогащает запас знаний и способствует формированию гармоничной личности в целом. Электронный читательский дневник ориентирован на стимулирование интереса и закрепление прочитанного материала, что достигается внедрением в сам процесс фиксирования результатов прочтения текста положений Agile-технологий, а также реализацией процесса интерактивного взаимодействия со школьником. В работе представлена архитектура разработанного решения: в частности, рассмотрен вопрос перспективы интеграции с Автоматизированной системой управления ресурсами системы образования. Также приводится карта маршрута по разработанным экранным формам и описание наиболее значимых экранных форм электронного читательского дневника. В конечном итоге, это будет способствовать развитию познавательной и творческой активности школьника.

Ключевые слова: электронный читательский дневник, образование, читательская компетентность, agile-технологии, scrum-board, автоматизированная система управления ресурсами системы образования

Введение

Целью разработки электронного читательского дневника является стимулирование интереса школьников младших классов к процессу чтения. Под читательским дневником принято понимать конспект произвольной формы, в котором фиксируется информация о прочитанной книге. Добавление слова «электронный» в большинстве случаев означает лишь констатацию того факта, что дневник создается в текстовом редакторе с добавлением различных иллюстраций. Однако, несмотря на то, что процесс создания читательского дневника включает творческую составляющую, главным является не оформление, а содержание. Основная цель ведения читательского дневника – помочь ребенку запомнить и понять произведение, научить ребенка делать из прочитанного выводы, научиться выделять главное. А развитие любви к чтению является скорее «побочным» продуктом.

Проблема стимулирования читательской активности не является новой для методики преподавания: еще в XIX веке глава русской мифологической школы, филолог и лингвист Буслаев Ф.И. отмечал необходимость чтения как основы преподавания. Позже затронутые Буслаевым вопросы были развиты в работах Водовозова В.И., Острогорского В.П., Стоюнина В.Я. и других.

В XX веке чтение идентифицировалось как одно из обязательных и естественных проявлений грамотности. С развитием информационных технологий и коммуникационной цивилизации акцент с чтения смещается, и человек в большей степени начинает осознавать себя ИТ-пользователем. Поэтому необходимо прилагать усилия для формирования особого, осознанного отношения к чтению, персонального осознания себя как читателя, субъекта чтения [1].

В начальной школе развитие культуры чтения принято считать основой формирования универ-

сальных компетенций учащегося и предполагает совершенствование как технической, так и смысловой стороны, которая характеризует читательскую компетентность человека как способность к индивидуальному осмыслению прочитанного. Анализ произведения способствует развитию внимательности, умению структурировать мысли, развивать навыки письменной речи и работать с информацией. Специфика читательской вовлеченности заключается в формировании положительного интереса учащегося к чтению с листа или с экрана, который становится для школьника значимым и приобретает эмоциональную привлекательность по мере увеличения степени соответствия его духовным потребностям и особенностям его читательской психологии. Исходя из данных предпосылок, целесообразным представляется внедрение элементов автоматизации для активизации читательской активности за счет разработки электронного читательского дневника.

Разрабатываемый программный продукт ориентирован на школьников начальных классов (1–4 классы, возраст 7–10 лет). В данном возрасте детям бывает довольно сложно сосредоточить свое внимание на каком-то одном занятии в течение длительного времени и еще сложнее – что-то запомнить.

Согласно Федеральному государственному стандарту начального общего образования, ребенку в начальной школе должны привить две группы умений:

- универсальные умения, необходимые для развития способности к обучению (т.е. формирование навыков решения творческих задач, а также навыков поиска, анализа и интерпретации информации);
- формирование мотивации к обучению, получение навыков для самоорганизации, саморазвития и социализации в дальнейшем.

Электронный читательский дневник (ЭЧД) способствует развитию этих навыков и умений. Целями ведения электронного читательского дневника выступают:

- формирование умений планировать, анализировать и корректировать индивидуальный круг чтения;
- формирование техники и навыков осмысленного чтения;
- формирование навыков творческой деятельности.

Предлагаемый проект «Электронный читательский дневник» ориентирован на формирование у младших школьников навыков работы с текстами художественных произведений, а также развитие познавательной и творческой активности путем внедрения положений Agile-технологии. Использование цифровых инструментов может способствовать оптимизации образовательного процесса за счет повышения степени вовлеченности ученика в сам процесс обучения, а также позволит родителям без излишних затрат времени эффективно участвовать в процессе обучения своего ребенка.

Особенности организации цифровой образовательной среды в школьном учреждении

Поколение современных учеников – это дети, родившиеся и развивающиеся в насыщенной информационной среде. По сравнению со взрослыми, они гораздо лучше адаптируются к постоянно изменяющимся информационным условиям и продуктам (гаджетам, новым ИТ-продуктам и технологиям и пр.).

Соответственно осуществляется и адаптация системы образования под новые реалии. Одним из наиболее заметных процессов в сфере образования является формирование цифровой образовательной среды. Датой старта централизованного внедрения цифровой образовательной среды в систему общего образования под эгидой государства принято считать 10 декабря 2020 г. – дату начала проведения эксперимента, регулируемого постановлением Правительства РФ от 7 декабря 2020 г. № 2040 «О проведении эксперимента по внедрению цифровой образовательной среды» (вместе с «Положением о проведении на территории отдельных субъектов Российской Федерации эксперимента по внедрению цифровой образовательной среды») [2].

Федеральный проект «Цифровая образовательная среда» (ЦОС) направлен на создание и внедрение в образовательных организациях цифровой образовательной среды, обеспечения реализации цифровой трансформации системы образования [3].

В соответствии с [4], под ЦОС принято понимать совокупность условий для реализации образовательных программ начального общего, основного общего и среднего общего образования с применением электронного обучения, дистанционных образовательных технологий с учетом функционирования электронной информационно-образовательной среды, включающей в себя электронные информационные и образовательные ресурсы и сервисы, цифровой образовательный контент, информационные и телекоммуникационные технологии, технологические средства и обеспечивающей освоение учащимися образовательных программ в полном объеме независимо от места их проживания.

В конечном этапе ЦОС следует рассматривать как единую информационную платформу, единое пространство для обеспечения процесса коммуникации для всех участников образовательных отношений, выступающее в качестве действенного и эффективного инструмента управления качеством реализации образовательных программ.

В Самарской области в рамках формирования ЦОС реализуется геоинформационная система АСУ РСО (автоматизированная система управления региональной системы образования <https://asurco.ru/>) – комплексная информационная система, объединяющая в единую сеть школы и органы управления в пределах муниципального образования и формирующая тем самым единое цифровое информационное пространство.

В АСУ РСО реализована возможность организации внутришкольных информационных пространств: для каждой группы пользователей (преподавательский персонал, ученики и их родители) реализован авторизованный доступ к информации. При этом права доступа к информации разграничены в соответствии с назначенной ролью и гибко настраиваются. Кроме того, в АСУ РСО могут одновременно работать пользователи разных школ (каждой школе доступен свой собственный сегмент), а также к обобщенной информации по учебному учреждению имеют удаленный доступ специалисты органов образования для формирования актуальных статистических и прочих отчетов с различным уровнем детализации.

Также в АСУ РСО реализованы инструменты для общения и коллективной работы, с помощью которых обучающийся может общаться как с одноклассниками, так и с учителями через электронную почту АСУ РСО или на форуме. Родители чаще всего используют функцию доступа к электронному дневнику своего ребенка, через который можно оперативно узнавать об успеваемости своего ребенка, об имеющихся задолженностях по предмету,

просматривать домашние задания и контролировать их своевременную сдачу, а также удаленно общаться с учителями и другими родителями. Кроме того, родители получают доступ к школьным объявлениям и расписанию занятий.

Для управленческого персонала в АСУ РСО разработаны инструменты для осуществления мониторинга учебного процесса и формирования отчетов различной степени детализации.

Таким образом, можно утверждать, что АСУ РСО как часть цифровой образовательной среды ориентирована на эффективное и комфортное предоставление инфокоммуникационных услуг и цифровых инструментов для построения открытой системы образования, дающее в конечном итоге возможность любому обучающемуся формировать собственную индивидуальную образовательную траекторию. Однако проведенный анализ имеющихся обширных функциональных возможностей показал, что в АСУ РСО отсутствует возможность ведения электронного читательского дневника.

Концепция реализации электронного читательского дневника

В рамках работ планируется создание электронной версии читательского дневника (замещающую или использующую наряду с бумажным читательским дневником) для формирования читательской компетентности у учащихся начальной школы. С помощью ЭЧД пользователи (учащиеся и их родители) смогут отслеживать количество прочитанной литературы (с помощью «бегунка», отображающего процент прочитанного в заданной книге).

В ходе работ были изучены существующие аналоги читательского дневника. Основным аналогом выступает обычный бумажный читательский дневник (обычная тетрадь для внесения рукописных записей либо бланк читательского дневника, выполненный типографским способом). Это традиционный способ ведения читательского дневника. Если сравнивать данный способ, то можно выделить следующие преимущества ведения электронного читательского дневника:

- разрабатываемый программный продукт устойчив к внешним воздействиям: электронный читательский дневник не порвётся, не помнется, не испачкается;
- родитель может проверять ЭЧД в любой удобный момент времени по мере его заполнения (а не сразу полностью заполненный в конце летних каникул);
- проверка ЭЧД может осуществляться удаленно (нет необходимости в материальном носителе), что актуально в условиях дистанционного

обучения (карантин или отсутствие ребенка вследствие болезни).

К недостаткам ЭЧД как такового можно отнести следующее: необходимость фиксации заметок осуществляется в печатной форме, что приводит к снижению скорости развития мелкой моторики и стимулирования письма. Однако данный тип недостатка относится, в целом, к самой технологии применения цифровых инструментов.

Более близкими аналогами можно назвать приложения «Читательский дневник» (<https://apps.rustore.ru/app/com.example.book>) «Bookmory – трекер книг» (<https://play.google.com/store/apps/details?id=net.tonysoft.bookmory>) и «Reading Tracker трекер чтения» (<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.devapp.readingtracker>).

В приложении «Читательский дневник» реализована возможность отмечать факт прочтения книги, можно сохранять понравившиеся цитаты, фиксировать динамику чтения книги. К интересной функциональной возможности следует отнести заявленную возможность проверки скорости чтения. В целом, этот программный продукт больше ориентирован на читателей старшего возраста, у которых уже сформированы читательские предпочтения. В программном продукте основной упор сделан на чтение электронной версии произведения с мобильного устройства. Данный вариант не подходит для школьников младшего возраста, поскольку отвлекает ребенка от основной задачи чтения, а также отрицательно может влиять на зрение.

В мобильном приложении «Bookmory-трекер книг» реализована большая часть функций предлагаемого решения. Приложение позволяет не только отследить количество прочитанной литературы, но и указать вид книги (электронная, бумажная, аудиокнига), а также, если книга была получена в пользование на ограниченный срок (например, книгу взяли в библиотеке) можно указать дату, когда книга должна быть возвращена. Минусом данного приложения является то, что здесь нет возможности заполнения читательского дневника с компьютера или ноутбука, а использование телефона для заполнения читательского дневника ведет к перенапряжению глаз, что впоследствии может привести к снижению зрения.

В приложении «Reading Tracker трекер чтения» основной особенностью является возможность отслеживания прогресса в прочтении книг с помощью графика, который строится на основе данных о чтении, предоставленных пользователем. Приложение позволяет отмечать прочитанные книги и устанавливать цели по прочтению определённого количества страниц. Главный недостаток приложе-

ния заключается в том, что оно не позволяет оставлять заметки о прочитанном.

Предлагаемый авторами статьи вариант реализации ЭЧД первоначально ориентирован на фиксацию результатов прочтения ребенком бумажной версии книги. Это сделано преднамеренно, поскольку школьникам младшего возраста зачастую бывает сложно на чем-то сосредоточиться. Кроме того, сам факт перелистывания страниц бумажной версии книги стимулирует мелкую моторику и закрепляет интерес к самому процессу чтения. Для читателей старшего возраста в качестве перспективы развития ЭЧД можно предусмотреть интеграцию с сервисами электронных книг.

Разработанная архитектура решения имеет модульную структуру (рисунок 1). Данное приложение планируется разработать в виде web-приложения для последующей интеграции в систему АСУ РСО.

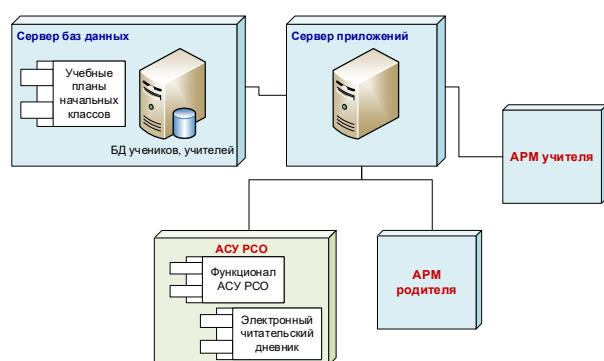


Рисунок 1. Архитектура ЭЧД

Осуществление проекта предполагает две стадии. В рамках первой стадии планируется реализация прототипа с внедрением положений Agile-технологий для стимулирования мотивации к чтению.

Первая версия программного приложения предусматривает две роли: «учащийся» и «родитель» (рисунок 2). Отличительной особенностью проекта является внедрение в сам процесс «приучения» к чтению положений гибких технологий. Как отмечают авторы [5–7], Agile следует рассматривать не просто как некую технологию, а как определенный образ мышления. Данная технология состоит из совокупности определенного количества самых разных «гибких» подходов, а также различных практик, хорошо зарекомендовавших себя в различных областях. Agile-технология выступает особым видом проектной деятельности, активно применяющимся в очной и онлайн-форме школьного и вузовского образования [7]. Применительно к образовательной сфере, гибкие инструменты характеризуются интерактивностью, итеративностью и наглядной визуализацией.

Интерактивность реализует метод, который позволяет учащемуся самостоятельно найти ответ на поставленный вопрос задачу, при этом родитель (или учитель) корректирует последующий этап решения задачи в зависимости от прогресса. Применительно к процессу чтения этот подход означает, что должна быть реализована возможность гибкого установления задания в соответствии с количеством прочитанных страниц, а также формирования вопросов для проверки понимания прочитанного материала. Такой способ позволяет стимулировать критическое мышление и учить навыкам грамотного поиска в потоке информации. Итеративность означает не только классическую работу над ошибками, но и проактивную работу ребенка с учетом замечаний и получением обратной связи. Наглядная визуализация прогресса выполнения заданий осуществляется с помощью такого инструмента как «доска заданий» (более известное как Scrum-доска).

Scrum-доска считается одним из эффективных приемов для повышения мотивации и интереса, поскольку ответственность частично передается от учителя к самому ученику. В проектируемом ЭЧД Scrum-доска делится на четыре колонки (рисунок 4):

- «Необходимо» – в данную колонку родитель или учитель вводит полный перечень произведений, которые ребенок должен прочитать за лето;
- «Задано» – в данный столбец родитель указывает интервал страниц, которые ребенок должен прочитать за указанный период. Выбранное для чтения произведение подсвечивается в колонке «Необходимо»;
- «Прочитано» – здесь пользователь с ролью «Ребенок» указывает интервал прочитанных страниц по конкретному произведению;
- «Проверено» – родитель проверяет прочитанное и подтверждает / не подтверждает выполнение задания.

Необходимо, чтобы информация на Scrum-доске оперативно обновлялась, позволяя отображать актуальный прогресс достижения результата. Таким образом, реализуется принцип наглядной визуализации прогресса выполнения задания, что позволяет определить объем работ, распределение рабочей нагрузки и осуществлять мониторинг процесса чтения. Кроме того, следует отметить, что Scrum-доска отвечает всем требованиям ФГОС начального общего образования и является эффективным наглядным средством на уроке [8].

В рамках второй стадии предполагается добавление роли «учитель» и применение технологии нейронных сетей для осуществления первичной проверки написанного текста с последующей генерацией вопросов по прочитанному тексту. В насто-

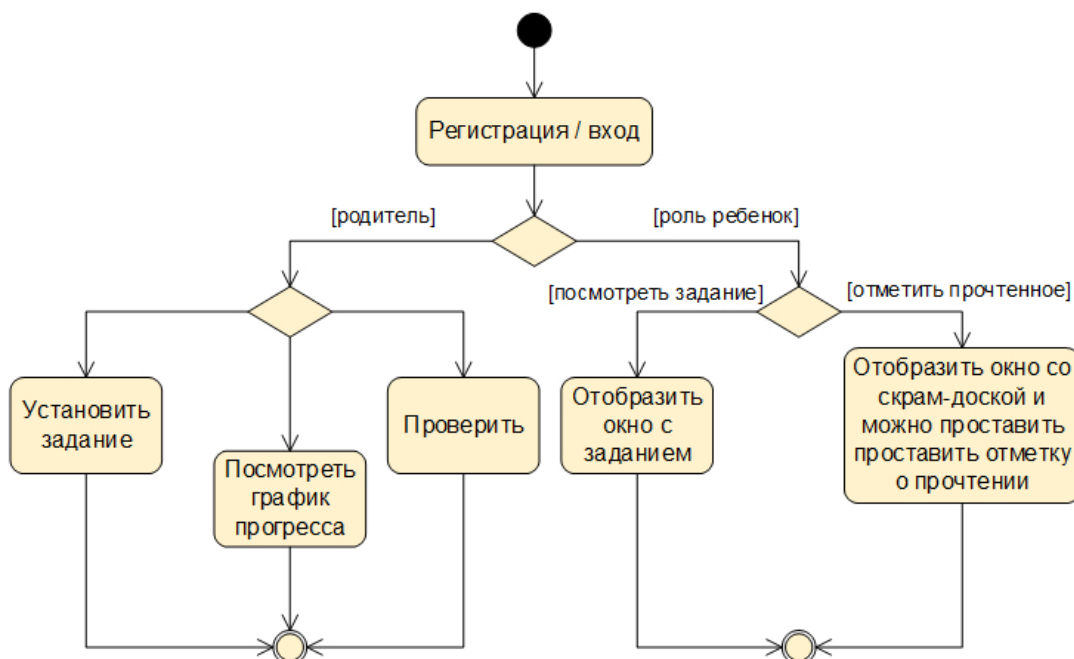


Рисунок 2. Алгоритм работы программного приложения «Электронный читательский дневник»

ящее время технология нейронных сетей активно внедряется в образовательный процесс. Основным потенциальным преимуществом данной технологии является возможность повышения качества образования, оптимизации учебного процесса и обеспечение персонализированного подхода к каждому ученику. Другим преимуществом называют возможность в обеспечении существенного сокращения времени, затрачиваемого на проверку степени выполнения заданий, что освободит учителей от рутины и позволит им уделять больше времени индивидуальной работе с учениками [9].

В идеале программы, разработанные на базе нейронных сетей, смогут самостоятельно принимать решения, насколько упрощать / усложнять обучающую траекторию ученика, программное обеспечение сможет обеспечивать обучающегося подсказками, учитывать нюансы, полученные в ответах пользователя [10]. Сложностью подключения технологии нейронной сети является недостаточность объема данных для обучения.

На текущем этапе проекта осуществлена разработка технического задания, определен обобщенный алгоритм работы ЭЧД (рисунок 2) и разработаны прототипы отдельных экранов форм (рисунок 3-4). В настоящей версии предполагается отдельный шаг при осуществлении процедуры регистрации (авторизации) пользователя. При реализации интеграции с АСУ РСО данный шаг будет осуществляться через АСУ РСО.

На рисунках 3-4 представлены макеты основных экранов форм ЭЧД.

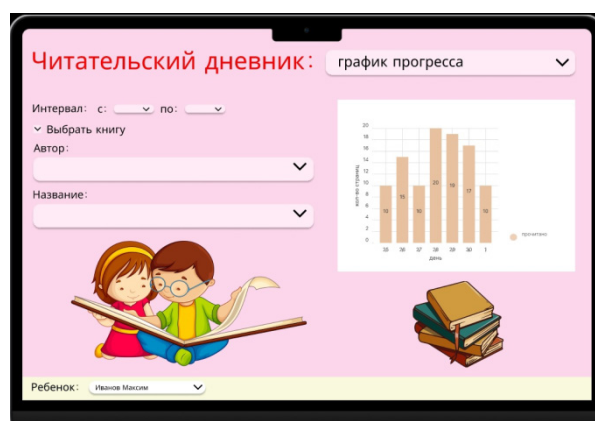


Рисунок 3. Макет экранной формы

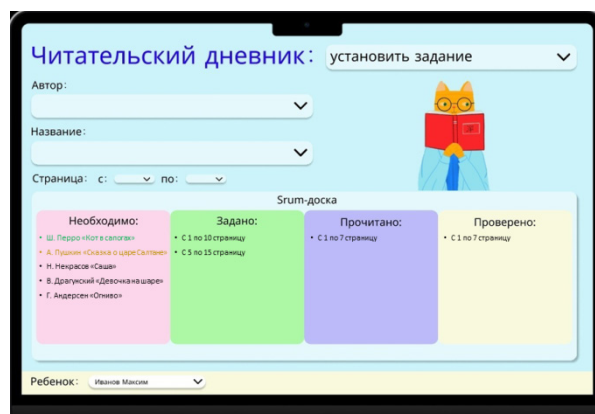


Рисунок 4. Макет Scrum-доски ЭЧД

Преимущества для учащихся – «прокачка» читательской компетенции, развивается речевое внимание к языковой стороне текста, внимание к деталям, умение анализировать лингвистическое, стилистическое и художественное своеобразие текста.

Преимущества для родителей – использование scrum-board стимулирует самостоятельность школьника, позволяет контролировать процесс и динамику выполнения заданий.

Преимущества для учителя – просматривать читательские дневники сразу после заполнения и писать свои комментарии (делать заметки), что будет способствовать сокращению времени на проверку. Также может быть предусмотрена возможность формирования статистических отчетов различного уровня детализации (например, кто из конкретных учеников имеет наилучшие / наихудшие результаты, консолидация по классу целиком и т.п.).

Перспективы развития электронного читательского дневника

Современные инфокоммуникационные технологии являются связующим звеном между элементами образовательной структуры, способствующими созданию для учащегося своей собственной индивидуальной образовательной траектории. Это предоставляет возможность повысить качество обучения.

Можно предложить следующие пути развития электронного читательского дневника.

Во-первых, реализация интеграции с АСУ РСО как логичного следствия взаимодействия между учителем и учеником. В настоящее время учителя «на лето» задают первоклассникам список книг, которые те должны прочитать и зафиксировать в бумажной версии читательского дневника. Встраивание ЭЧД в данный процесс позволит внедрить в процесс обучения некоторые элементы технологии гейминга: например, учитель (или родитель) может задавать задание на количество прочитанных страниц конкретной книги; выстраивать различные игровые стратегии («угадай автора», «темная лошадка», «установи последовательность» и пр.) [11–12]. Доказано, что игровая технология является одним из наиболее популярных методов внеклассной работы, которая позволяет максимально эффективно воздействовать на учеников: дети, погруженные в определенные заданные условия, проявляют больший интерес к конкретной теме и процессу обучения.

Во-вторых, одним из наиболее приоритетных направлений развития искусственного интеллекта в образовании является возможность выстраивания для учащихся индивидуальных траекторий образования. Если рассматривать данную потенциальную

возможность применительно к процессу мотивации читательской компетенции, то использование технологий искусственного интеллекта (ориентировочно, технологии нейронных сетей) позволит формировать планы чтения «подходящих» книг для конкретного школьника с учетом его интересов, потребностей и способностей.

К третьему направлению развития ЭЧД можно отнести потенциальную интеграцию с электронными сервисами книг (например, Литрес). Однако данная функциональная возможность носит дополнительный аспект, так как интерес к данному функционалу больше проявляют учащиеся среднего школьного возраста и выше (т.е. те пользователи, у которых уже сформированы читательские предпочтения).

Подводя итог, следует отметить перспективность предлагаемого проекта как одного из элементов цифровой образовательной среды, ориентированное на создание современным детям комфортной среды для их образования и развития.

Заключение

Процесс формирования читательских компетенций у школьников представляет собой актуальную задачу, он ориентирован на развитие познавательных интересов школьника, обогащение запаса знаний, развитие аналитических способностей.

В работе рассматриваются вопросы внедрения проекта электронного читательского дневника как действенного инструмента мотивации за счет реализации интерактивного взаимодействия со школьником младшего возраста. Актуальность исследования обусловлена необходимостью формирования читательской компетенции и приобщения молодого поколения к произведениям отечественной и зарубежной литературы в условиях активного применения новых цифровых инструментов и изменения системы коммуникаций.

Основной задачей ЭЧД является задача формирования навыков работы с текстами работы с текстами художественных произведений, а также развитие познавательной и творческой активности. Отличительной особенностью предлагаемого программного приложения является наличие Scrum-доски, что представляет собой мощный и эффективный инструмент для развития у детей навыков управления своим временем и ресурсами, то особенно важно на начальном этапе обучения в школе. Новизна проекта заключается во внедрении в процесс фиксации чтения положений и инструментов гибких технологий (упор сделан на применение Scrum-доски), а также потенциального применения технологии нейронных сетей для

выстраивания персонализированной траектории выполнения заданий. Предполагается встраивание ЭЧД в цифровую образовательную среду школы для эффективного и комфортного предоставления инфокоммуникационных услуг. В конечном итоге, это будет способствовать повышению мотивации к изучению предметов, равно как и познавательной и творческой активности школьника.

Литература

1. Терентьева Н.П. Мотивация читательской и литературно-творческой деятельности старшеклассников // Начальная школа плюс До и После. 2011. № 9. С. 86–91.
2. Карпенко А.С., Павлова С.М. Цифровая образовательная среда в России: проблемы, опыт внедрения и перспективы // Человеческий капитал. 2021. Т. 2, № 12 (156). С. 43–52.
3. Методические рекомендации по формированию цифровой образовательной среды в образовательной организации / под ред. Е.Н. Смирнова. СПб: ГБУ ДПО «СПбЦОКОиИТ», 2022. 71 с.
4. О проведении эксперимента по внедрению цифровой образовательной среды (вместе с «Положением о проведении на территории отдельных субъектов Российской Федерации эксперимента по внедрению цифровой образовательной среды»): Постановление Правительства РФ от 7 декабря 2020 г. № 2040. URL: https://lgn-sar.gosuslugi.ru/netcat_files/178/3084/5_Postanovlenie_Pravitelstva_RF_ot_07.12.2020_N_2040_TsOS_experiment.pdf (дата обращения: 15.03.2024).
5. Архипенков С.Я. Лекции по управлению программными проектами. М.: Самиздат, 2009. 128 с.
6. Шевцов В.В., Назарова О.В. Использование Agile-технологии в процессах обучения в вузе // Антропологическая дидактика и воспитание. 2022. Т. 5, № 5. С. 124–139.
7. Шегай Н.А. Agile-технология гибкого управления проектной деятельностью как средство формирования информационно-коммуникационной компетентности студентов вузов // Педагогика. Вопросы теории и практики. 2021. Т. 6, № 6. С. 1117–1125.
8. Касимов Р.Н., Смирнова М.Н. Scrum-доска как инструмент повышения мотивации к обучению младших школьников // Цифровая образовательная среда – интеграционная платформа развития учителя и учащегося: материалы Всероссийской научно-практической конференции. Армавир: РИО АГПУ, 2021. С. 141–144.
9. Чубаров Н.А. Использование искусственных нейронных сетей в образовании // Экономика. Общества. Человек: материалы национальной научно-практической конференции с международным участием. Белгород, 2023. С. 167–172.
10. Максимов В.П., Карякина И.Е., Гулевская А.Ф. Цифровые инструменты образования на основе нейронных сетей // Современное педагогическое образование. 2021. № 10. С. 160–164.
11. Громакова К.Е., Аркатова А.С. Игровые технологии на уроке литературного чтения // Научно-методический электронный журнал «Концепт». 2017. № Т39. С. 2921–2925.
12. Витевская О.В. Интерактивные методы обучения студентов технических вузов // Инфокоммуникационные технологии. 2016. Т. 14, № 1. С. 99–104.

Получено 03.04.2024

Диязитдинова Альфия Радмировна, к.т.н., доцент кафедры прикладной информатики (ПИ) Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ). 443090, Российская федерация, г. Самара, Московское шоссе, 77. Тел. +7 917 942-57-45. E-mail: dijazitdinova@mail.ru

Сальникова Дарья Александровна, студент кафедры ПИ ПГУТИ. 443090, Российская Федерация, г. Самара, Московское шоссе, 77. Тел. +7 917 955-65-00. E-mail: darya.a.salnikova@gmail.com

WEB APPLICATION «ELECTRONIC READER'S DIARY» BY AGILE TECHNOLOGY

Diyazitdinova A.R., Salnikova D.A.

Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russian Federation

E-mail: dijazitdinova@mail.ru

The article relate to the development of an reader's electronic diary by AGILE technology. It is needed for reader competency of primary school students. The current students were born in a new information

environment. They master information and software faster than adults (for example, gadgets, tablet PC, mobile devices, etc.) The disadvantage is this information environment is reluctance to read. One of the stimulation tools to reading is electronic reader's diary technology applied in the educational process. The regular reader's diary is a report about books read. The aim of the reader's diary is skills reflection and development of the critical analysis skills formation. The project software is designed for primary school students (age 7-10 years). Independent reading skills form at primary school age. It improves cognitive interests of school students, enhances knowledge, and is the formation of a harmoniously developed personality. The electronic reader's diary stimulates the knowledge interests and consolidates the reading material by AGILE technology and additional interactivity with the school students. The research relates to the architecture of the developed solution, in particular, the issue of the «automated process control system of education system resources» integration. Also, the article contains the map of the developed graphical user interface screen and describing main electronic reader's diary screens. This research will be intended to boost cognitive and creative activity of students.

Keywords: *electronic reader's diary, education, reader competency, agile technology, scrum-board, scrum-board, automated process control system of education system resources*

DOI: 10.18469/ikt.2023.21.4.10

Diyazitdinova Alfiya Radmirovna, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 77, Moskovskoe shosse, Samara, 443090, Russian Federation; Associated Professor of Applied Informatics Department, PhD in Technical Science. Tel. +7 917 942-57-45. E-mail: dijazitdinova@mail.ru

Salnikova Darya Alexandrovna, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 77, Moskovskoe shosse, Samara, 443090, Russian Federation; Student of Applied Informatics Department. Tel. +7 917 955-65-00. E-mail: darya.a.salnikova@gmail.com

References

1. Terentyeva N.P. Motivation of senior school readers' and literature-creative activity. *Nachal'naya shkola plus Do i Posle*, 2011, no. 9, pp. 86–91. (In Russ.)
2. Karpenko A.S., Pavlova S.M. Digital educational environment in Russia: problems, experience of implementation and perspectives. *Chelovecheskiy kapital*, 2021, vol. 2, no. 12 (156), pp. 43–52. (In Russ.)
3. *Methodological recommendations for the formation of a digital educational environment in education*. Ed by Smirnova E.N. Saint Petersburg: GBU DPO «SPbTSOKoIT», 2022, 71 p. (In Russ.)
4. On conducting an experiment on the implementation of a digital educational environment (together with the «Regulations on conducting an experiment on the implementation of a digital educational environment on the territory of certain constituent entities of the Russian Federation»): Decree of the Government of the Russian Federation dated December 7, 2020, 2040. URL: https://lgn-sar.gosuslugi.ru/netcat_files/178/3084/5_Postanovlenie_Pravitelstva_RF_ot_07.12.2020_N_2040_TsOS_experiment.pdf (accessed: 15.03.2024). (In Russ.)
5. Arkhipenkov S.Ya. *Lectures on project management software*. M.: Samizdat, 2009. 128 p. (In Russ.)
6. Shevtsov V.V., Nazarova O.V. Use of agile-technology in the processes of studying at the university. *Antropologicheskaya didaktika i vospitaniye*, 2022, vol. 5, no. 5, pp. 124–139. (In Russ.)
7. Shegai N.A. Agile project management methodology as a means to form higher school students' information and communication competence. *Pedagogika. Voprosy teorii i praktiki*, 2021, vol. 6, no. 6, pp. 1117–1125 (In Russ.)
8. Kasimov R.N., Smirnova M.N. Scrum board as a tool for increasing study motivation for younger schoolchildren. *Cifrovaya obrazovatel'naya sreda – integracionnaya platforma razvitiya uchitelya i uchashchegosya: materialy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii*. Armavir: RIO ASPU, 2021, pp. 141–144. (In Russ.)

9. Chubarov N.A. The use of artificial neural networks in education. *Ekonomika. Obshchestva. CHelovek: materialy nacional'noj nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem*. Belgorod, 2023, pp. 167–172. (In Russ.)
10. Maksimov V.P., Karyakina I.E., Gulevskaya A.F. Digital educational tools based on neural networks. *Sovremennoye pedagogicheskoye obrazovaniye*, 2021, no. 10, pp. 160–164. (In Russ.)
11. Gromakova K.E., Arkatova A.S. Gaming technologies in literature lessons. *Nauchno-metodicheskij elektronnyj zhurnal «Koncept»*, 2017, no. T39, pp. 2921–2925. (In Russ.)
12. Vitevskaya O.V. Interactive training methods for students of technical universities. *Infokommunikatsionnyye tekhnologii*, 2016, vol. 14, no. 1, pp. 99–104. (In Russ.)

Received 03.04.2024

УДК 004.915

ИЗВЛЕЧЕНИЕ СМЫСЛА ИЗ ТЕКСТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЛОБАЛЬНОЙ МАТРИЦЫ ДЛЯ ЛУЧШЕГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕЖДУ ЧЕЛОВЕКОМ И МАШИНОЙ

Аббаси М.М., Бельтюков А.П.

Удмуртский государственный университет, Ижевск, РФ

E-mail: mohsinmanshadabbasi@gmail.com

Взаимодействие между человеком и машиной представляет собой технологическое будущее. Для взаимодействия с машинами используются различные механизмы, такие как голос, сигналы, действия, текст и т.д. Взаимодействие с машинами, использующими текст, является основной темой данного исследования. Текстовый анализ приобрел популярность за последние десятилетия. Он находит применение в различных областях, таких как прогнозирование тенденций фондового рынка, анализ общественного мнения, идентификация групп людей со схожими интересами и т.д. В этом исследовании основное внимание уделяется изучению смысла текста для достижения лучшего взаимодействия человека и машины. Это взаимодействие включает автоматическую идентификацию потребностей или намерений автора текста и соответствующую реакцию машины на намерения автора. Были предложены различные модели и алгоритмы полуавтоматического взаимодействия между человеком и машиной. Распространенные примеры полуавтоматического взаимодействия машинных агентов можно наблюдать в онлайн-системах для обслуживания клиентов банков и телекоммуникационной отрасли. Это исследование направлено на разработку полностью автоматизированной модели с целью извлечения смысла из текста и использования намерений автора для прогнозирования идей последующих текстов.

Ключевые слова: глобальная матрица, локальная матрица, матрица ошибок, лемматизация, сегментация, текст, методы и инструменты, мнения

Введение

Взаимодействие между человеком и машиной представляет собой будущее развития технологий. Человек становится зависимым от машины в выполнении повседневных действий. Ожидается, что в будущем машины будут соответствовать уровню интеллекта человека. Для взаимодействия с машинами используются различные механизмы, такие как голос, сигналы, действия, текст и т.д. Взаимодействие с машинами, использующими текст, является основной темой данного исследования. Анализ текста – это часть обработки естественного языка, которая включает модели и механизмы, используемые для идентификации и извлечения из него важной информации. Анализ текста и его классификация находят применение в различных областях. Читатель часто оказывается сбиваемым с толку, особенно в случаях с коммерческими организациями, когда те пытаются определить намерения своих клиентов по электронной почте или посредством

обратной связи. Это статья еще более затруднительным, если с клиентом взаимодействует машина.

Извлечение смысла из текста – это механизм для определения взглядов клиента. Это тип извлечения информации, который включает в себя идентификацию ограниченной части текста и сохранение ее в структурированной форме. Структурирование информации в семантической форме облегчает процесс ее дальнейшего вывода компьютерной программой. В этой работе извлечение смысла было выполнено на основе текста, используемого для взаимодействия между человеком и машинным агентом. Тема взаимодействия касалась онлайн-покупок. Машинный алгоритм был сконструирован для извлечения смысла из текста, написанного человеком, путем проведения анализа предложений из текста по отдельности.

Типичное предложение состоит из информации, которая включает в себя намерение и контекст. Намерение – это цель или то, что человек хочет сделать.

Контекст – это остальные элементы, связанные с намерением. Человеку легче понять смысл текста, но для машин это довольно сложная задача, поскольку машины воспринимают предложение как последовательность слов. Для этого требуется, чтобы машина научилась понимать слова в предложениях и определять смысл текста. Это полезно для улучшения механизма веб-поиска и контроля автоматической обработки сообщений машинами. Текстовое сообщение обычно состоит из длинных предложений с обычным и нетрадиционным речевым содержанием.

Во время взаимодействия люди ведут себя по-разному. Некоторым требуется подробная информация, в то время как для других достаточно просто основной информации по теме. Очень распространенным методом является подготовка отдельного словаря, в котором фиксируются намерения человека, и увеличение объема данных. Увеличение объема данных – это процесс искусственного генерирования новых данных из уже имеющейся информации. Цель состоит в увеличении количества данных для обучения алгоритмической программы. В таких приложениях, как классификация изображений и обработка сигналов, увеличение объема данных удовлетворяет потребность в большом количестве данных. В рамках разработанной методологии была создана глобальная матрица признаков, которая послужила словарем для обучения программы.

Научные труды, связанные с данной работой

История анализа намерений на основе текста восходит к началу 60-х годов. В 1963 году Ф. Моствеллер и Д. Уоллес изучали проблему авторства в тексте. Они заметили, что лингвистические особенности текста предоставляют информацию об авторе текста. Стиль текста помогает определить намерения автора текста [1]. В 1989 году Г. Альтман и Х. Швиббе проанализировали текст и заметили разницу между количеством слов при формулировании вопросов и ответов. Они предположили, что разница в семантике вопросов и ответов является причиной разницы в количестве слов [2]. В 1997 году С. Хохрайтер и Ш. Юрген использовали методы глубокого обучения и долговременную и кратковременную память для анализа текста на уровне предложений с целью распознавания сущностей и моделирования языка [3].

В 2005 году И. Грейвс и Ш. Юрген проанализировали смысл текста с использованием прямой и обратной модели LSTM (Long short-term memory). Они заметили, что обратная модель LSTM генерирует правильный контекст после добавления в текст не-

которой важной параметрической информации [4]. Позже, в 2008 году, Сяо Ли и соавторы использовали методы, основанные на графах, чтобы узнать намерения пользователя из текстового документа [5].

В 2010 году Р. Рехурек и П. Сойка проанализировали намерение в трех различных корпусах текста, которые включают вопросы, ответы и их совокупность. Они отфильтровывали слова с частотой повтора менее 5. Аналогичным образом из текста были отфильтрованы ненужные цифры, знаки препинания и другие символы, чтобы уменьшить его объем перед проведением анализа намерений [6]. В 2011 году Р. Коллоберт и соавторы использовали нейронную сеть для встраивания последовательности слов со слоем CRF в верхней части сети [7].

Позже, в 2012 году, Ч.К. Джеки и Сяо Ли проанализировали намерение из текста, используя методы кластеризации. Они автоматически обнаружили шаблоны намерения в тексте [8]. В 2013 году для идентификации намерений в тексте пользователей приложения был применен семантический разбор [9]. В 2014 году В. Гупта и соавторы классифицировали текстовое сообщение на такие классы, как намерение совершить покупку и классы намерений, не связанных с покупкой текста [10]. В 2015 году Ц. Ванг и др. изучили намерения пользователей по тексту Twitter. Они использовали полууправляемый подход для категоризации твитов пользователей [11]. В том же году Ф. Кути и др. проанализировали реакцию людей на похожие вопросы. Они наблюдали за чрезмерной нагрузкой вопросов на поведение пользователей, рассчитали время ответа и спрогнозировали характеристики их поведения [12]. В 2016 году Х. Хашеми и др. создали систему обнаружения намерений с использованием метода глубоких нейронных сетей [13]. Позже, в 2016 году, Д.Д. Кастро и др. проанализировали четыре распространенные реакции клиента во время взаимодействия, такие как чтение, ответ, удаление без прочтения и просто удаление сообщения [14].

В том же году П. Рамарао и др. разработали поисковую систему для идентификации электронной почты и содержания текста в ней [15]. Следуя той же области исследований, М. Саппелли и др. определил неполную категорию для извлечения намерений из текста, относящуюся к обмену информацией, составлению расписания, планированию и социальной коммуникации [16]. В 2017 году Л. Янг и др. представили модель извлечения намерений из документов в корпорации. Они прогнозировали поведение пользователя при получении текста и его интенсивность [17]. М.М. Аббаси и др. проанализированы логические характеристики текста, выявлена роль эмоций для определения полярности

текстового документа и предложены различные методы анализа текста и его обобщения [18-27]. В 2018 году С. Нисиои и др. проанализировали содержание словаря, используемого заказчиком в среде планирования ресурсов предприятия (ERP). Он предоставляет модель для очистки и извлечения соответствующего намерения из текста [28].

В 2021 году Альджуайд Х. и др. применили методы анализа настроений для выявления важных цитат в статье. Они предложили механизм цитирования статей в хронологическом порядке, основанный на их важности и релевантности документу [29]. В 2022 году С. Сурана и др. использовали технологии машинного обучения в документе для идентификации изображений в нем и извлечения текста, который отражает намерение представить эти изображения в документе [30]. В 2023 году Ихсан И. и др. использовал метод опорных векторов для понимания и извлечения причин цитирования исследовательских статей в разделе литературы новой статьи и для классификации цитат в различных группах на основе их ранга [31].

Методология

Анализ начинается с определения основных компонентов и особенностей текста. Компьютерная программа, созданная в ходе этой работы, использует метод обучения под наблюдением, чтобы извлечь смысл, который автор вложил в текст, сгенерировать признаки намерения и затем классифицировать их под разными названиями. Методы обучения под наблюдением требуют некоторых предварительных знаний о содержании текста для первоначального обучения программе.

Например, если текст посвящен онлайн-покупкам, то основными темами, представляющими интерес для взаимодействия клиентов с машиной, могут быть их заказы, жалобы, платежи и другая информация о продуктах. Знание слов, часто используемых для демонстрации конкретного смысла текста автора, является предварительным условием для разработки алгоритма, способного автоматически извлекать этот смысл и классифицировать текст на основе его извлечения.

Наш контролируемый алгоритм обучения (supervised learning algorithm) начинается с набора данных $D = \{(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)\}$, где каждый x_i является «входным вектором особенности», а y_i – соответствующей «выходным вектором категории». Мы предположили, что эти точки данных взяты из некоторого неизвестного распределения P , поэтому $(x_i, y_i) \approx P$, где мы имеем (x_i, y_i) независимыми и одинаково распределенными. Формально мы можем заключить, что:

$$D = \{(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)\} \subseteq R^d \times C,$$

где n – размер нашего набора данных, R^d представляет d -мерное пространство особенности, x_i представляет вектор объектов i^{th} примера, y_i представляет категорию или выходные данные i^{th} примера, а C – это пространство всех возможных меток или категория пространства.

Нашу цель контролируемого машинного обучения можно резюмировать как нахождение функции $h: R^d \rightarrow C$, такой, чтобы для каждой новой пары ввода/вывода (x, y) , выбранной из P , мы имели

$$h(x) \approx y.$$

Чтобы проверить эффективность предложенной нами модели извлечения смысла из текста с использованием глобальной матрицы, мы использовали алгоритм контролируемого обучения под названием «матрица ошибок», результаты которого подробно описаны в разделе «Результаты и обсуждение» этой статьи. Четырьмя основными компонентами для обработки матрицы ошибок являются TP (Истинно положительный результат), FN (Ложно отрицательный результат), FP (Ложно положительный результат) и TN (Истинно отрицательный результат).

Среди них два компонента, TP (Истинно положительный) и TN (Истинно отрицательный), разъясняют, что значения истинности и что результаты классификации, полученные с помощью нашей модели, релевантны или правильными, тогда как FN (Ложно отрицательный) и FP (Ложно положительный) детализируют ошибки или неправильную классификацию, допущенные матрицей ошибок при классификации текста. Эти четыре компонента используются для расчета показателя эффективности и классификационной способности алгоритма. Этими показателями эффективности являются Точность измерений (Accuracy), Отзыв (Recall), Точность результата измерений (Precision) и F- Мера (F-Measure).

Эксперимент

Для эксперимента был выбран текст на тему онлайн-покупок. Были загружены текстовые документы из разных онлайн-блогов, таких как: «<https://frenzyshopper.ru/shopping-forums/>», «<https://pikabu.ru/tag/покупки%20в%20интернете/hot>», «<https://www.gsconto.com/ru/blogs/show/gsconto>», «<https://blog.onex.am/onlineshopping-rus>», «<https://pochtaglobal.ru/blog/>» и т.д..

На таблице 1 ниже представлена глобальная матрица особенности характеристик текста об онлайн-покупках. Она содержит наиболее часто используемые слова для онлайн-покупок вместе с их синонимами.

Таблица 1. Глобальная матрица особенности онлайн-покупок

Глобальная матрица особенности для онлайн-покупок		
Особенность (Features)	Синоним слова	Категория
Желаю Быстро Качество	https://www.labinform.ru/pub/ruthes/ https://synonyms.ru/	Заказ
Карта Ошибка Сделки Успешным Неудачной		Платеж
Пожалуйста Любезно Предоставьте		Информация
Опаздываю Не работаю Плохо		Жалоба

Вектор особенности (feature vector) на рисунке выше представляет список слов, используемых покупателями во время онлайн-покупок. Вектор особенности (feature vector) включает краткий список слов, обычно используемых для представления конкретных намерений клиента в письменном тексте об онлайн-покупках. Глобальный словарь содержит синонимы слов из вектора особенности (feature vector). Эти синонимы были извлечены из онлайн-базы данных «<https://synonymonline.ru/vocabulary.html>» и «<https://www.labinform.ru/pub/ruthes/>» использование API's.

Затем программа была обучена извлекать и классифицировать слова из письменного текста по назна-

ченным классам или категориям, с использованием содержимого глобальной матрицы особенности.

На этапе тестирования текст был предварительно обработан перед определением его смысла. Предварительная обработка включает в себя удаление из него знаков препинания и стоп-слов. Затем предварительно обработанный текст был сегментирован на последовательности предложений, и каждое предложение было дополнительно разделено на слова с применением алгоритма максимального объединения (Max Pooling).

Выделенные слова были лемматизированы. Лемматизация – это процесс преобразования слов в их корневую или начальную форму. Обученная программа создала новую локальную матрицу признаков, которая содержит список предложений, список слов в каждом предложении и частоту встречаемости слов векторов признаков в тексте. Каждый раз, когда алгоритм обучает следующий текст, матрица локальных особенностей обновляется. Программа сравнивает содержимое матрицы локальных признаков с глобальными.

Результаты и обсуждение

Как объяснялось ранее, для эксперимента по извлечению смысла текста были выбраны тексты из разных блогов об онлайн-покупках. Цель тестирования разных текстов разными пользователями - определить производительность и точность предложенного алгоритма на разных текстах. Возможность классификации и точность алгоритма для пяти различных текстов об онлайн-покупках представлены ниже в таблице 2.



Рисунок 1. Частота слов, отражающих смысл исследуемого текста пользователя

Где «Кол. пред.» представляет количество предложений в тексте, «Кат.» представляет классификацию, «Т» представляет точность измерений (Assuracy), «R» представляет отзыв (Recall), «Р» представляет точность результата измерений (Precision) и «F-Мер» представляет F- Меру (F-Measure).

Таблица 2. Анализ результатов с использованием матрицы ошибок

Кол. пред.	Кат.	T	R	P	F-Мер
85	Заказ	85%	75%	71%	80%
50	Информация	81%	68%	72%	69%
110	Заказ	70%	77%	69%	72%
52	Жаловаться	75%	81%	77%	69%
120	Информация	71%	65%	74%	71%

Для дальнейшего анализа и определения производительности машинной программы рассчитывается матрица ошибок и ее параметры, их результаты представлены в таблице 2 с использованием таких характеристик матрицы ошибок, как точность, прецизионность, отзыв и F-мера. Эти особенности матрицы ошибок отражают высокий процент истинной классификации намерений пользователей в тексте машинным алгоритмом. Машинный алгоритм хорошо работает при классификации намерений пользователя по различным классам глобальной матрицы особенностей. Частота употребления слов, отражающих намерения клиента, в различных предложениях текста представлена на рисунке 1 ниже.

На рисунке 1 выше показано извлечение намерений и их классификация во время анализа предложений программой. Некоторые предложения содержат больше слов, которые представляют намерения пользователя, другие предложения - меньше. Например, для классификации текста в категории «Жаловаться», представленной на графике желтым цветом, первые три предложения содержат больше намерений пользователя, затем в последующих предложениях наблюдается их небольшое уменьшение, а потом к концу текста намерение в предложениях снова возрастает. На приведенном выше графике прослеживается механизм классификации намерений пользователя в тексте с помощью машины.

Заключение

В статье представлена модель улучшенного взаимодействия между человеком и машиной. Модели, ранее предложенные исследователями, в основном, касаются извлечения смысла из электронных писем или из статического текста. Алгоритм, представленный в этом исследовании, работает с

динамическим текстом, и по мере роста текста способность алгоритма к классификации совершенствуется. Модель обеспечивает основу для перевода машины из полуавтоматического в полностью автоматизированный режим с использованием методологии контролируемого обучения. Результаты эксперимента демонстрируют высокую точность извлечения намерений и их отнесения к соответствующему классу. Результаты матрицы локальных особенностей можно наблюдать во время каждой итерации алгоритма над предложением. В будущем программа будет протестирована на разнородных типах текста, и акцент будет смещен с контролируемых механизмов обучения на неконтролируемые.

Список литературы

1. Mosteller F., Wallace L.D. Inference in an authorship problem // Journal of the American Statistical Association. 1963. Vol. 58, no. 302. P. 275–309.
2. Altmann G., Schwibbe H. Das Menzerathsche Gesetz in Informations verarbeitenden Systemen. Hildesheim: Georg Olms Verlag, 1989. 132 p.
3. Hochreiter S., Jrgen S. Long short term memory // Neural Computation. 1997. Vol. 9, no. 8. P. 1735–1780.
4. Graves I., Jrgen S. Frame wise phoneme classification with bidirectional LSTM and other neural network architectures // Neural Networks. 2005. Vol. 18, no. 5. P. 602–610.
5. Li X., Ye-Yi W., Alex A. Learning query intent from regularized click graphs // Proceedings of the 31st Annual International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval. 2008. P. 339–346.
6. Rehurek R., Sojka P. Software framework for topic modelling with large corpora // Proceedings of the LREC 2010 Workshop on New Challenges for NLP Frameworks. Malta, Valletta: Sponsored by European Land Registration Authority (ELRA), 2010. P. 45–50.
7. Natural language processing (almost) from scratch / R. Collobert [et al.] // Journal of Machine Learning Research. 2011. Vol. 12. P. 2493–2537.
8. Jackie C.K., Li X. Sequence clustering and labeling for unsupervised query intent discovery // Web Search and Data Mining. 2012. P. 383–392.
9. Activity inference for constructing user intention model / M. Hwang [et al.] // Computer Science and Information Systems. 2013. Vol. 10, no.2. P. 767–778.
10. Identifying purchase intent from social posts / V. Gupta [et al.] // Proceedings of the International AAAI Conference on Web and Social Media.

2014. Vol. 8, no. 1. P. 180–186.
11. Mining user intents in Twitter: a semi-supervised approach to inferring intent categories for tweets / J. Wang [et al.] // Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. 2015. P. 318–324.
12. Evolution of conversations in the age of email overload / F. Kooti [et al.] // 24th International World Wide Web Conference. 2015. P. 603–613.
13. Hashemi H.B., Siaee A.A., Kraft R. Query intent detection using convolutional neural networks // Proceedings of WSDM QRUMS Workshop, 2016. P. 691–697.
14. You've got mail, and here is what you could do with it!: Analyzing and predicting actions on email messages / D.D. Castro [et al.] // International Conference On Web Search And Data Mining (WSDM 2016). 2016. Vol. 16. P. 307–316.
15. InLook: revisiting email search experience / P. Ramarao [et al.] // Proceedings of the 39th International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval (SIGIR '16). New York: ACM, 2016. P. 1117–1120.
16. Assessing email intent and tasks in email messages / M. Sappelli [et al.] // Information Sciences. 2016. Vol. 358. P. 1–17.
17. Characterizing and predicting enterprise email reply behavior / L. Yang [et al.] // Proceedings of the 40th International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval (SIGIR '17). New York: ACM, 2017. P. 235–244.
18. Beltikov A.P., Abbasi M.M. Logical analysis of emotions in text from natural language // Bulletin of Udmurt University. Mathematics. Mechanics. Computer Science. 2019. Vol. 29, no. 1. P. 106–116.
19. Abbasi M.M., Beltikov A.P. Identifying the strength of emotions in relation with the topic of text using Word space // Proceedings of the 21th International Workshop on Computer Science and Information Technologies. Austria, Vienna: Atlantis, 2019. Vol. 3. P. 1–5.
20. Анализ эмоций из текстов для управления обществом / М.М. Аббаси [и др.] // Инфокоммуникационные технологии. 2019. Т. 2, № 17. С. 246–254.
21. Abbasi M.M., Beltikov A.P. Summarizing emotions from text using Plutchik wheel of emotion // Proceedings of the 7th All Russian Conference on Information Technology for Intelligent Decision Making Support (ITIDS). Ufa, 2019. Vol. 166. P. 291–294.
22. Abbasi M.M., Beltikov A.P. Analyzing emotions from text corpus using word space // Proceedings of the 19th International Workshop on Computer Science and Information Technologies (CSIT'2018). Varna: Industry 4.0, 2018. P. 90–94.
23. Abbasi M.M., Beltikov A.P. Analysis of sentiment and emotion from text written in Russian language // Информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений (ITIDS'2017): материалы 5 Всероссийской конференции. Уфа, 2017. Т. 1, № 1. С. 42–47.
24. Аббаси М.М. Инструменты Эмоционального анализ текстов в процесс управления и моделирования в сложных системах // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: материалы XX Международной конференции. Самара, 2018. С. 236–242.
25. Аббаси М.М., Белтюков А.П. Механизм предварительной обработки текста перед анализом настроений // Информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений (ITIDS'2018): материалы VI Всероссийской конференции. Уфа, 2018. С. 13–17.
26. Аббаси М.М., Белтюков А.П. Информационные технологии изменения стилистики текста для его эмоциональной модификации // Информационные технологии и системы: материалы VII Международной научной конференции. Ханты-Мансийск, 2019. С. 137–142.
27. Abbasi M.M., Beltikov A.P. Summarizing emotions from text using Plutchik wheel of emotion // Proceedings of the 7th All Russian Conference on Information Technology for Intelligent Decision Making Support (ITIDS). Ufa, 2019. Vol. 166. P. 291–294.
28. Nisioi S., Bucur A., Liviu P. Lexical analysis and content extraction from customer-agent interactions // Proceedings of the 2018 EMNLP Workshop WNUT: the 4th Workshop on Noisy User-generated Text. 2018. P. 132–136.
29. Important citation identification using sentiment analysis of intext citations / H. Aljuaid [et al.] // Telematics and Informatics. 2021. Vol. 56. P. 1–16.
30. Text extraction and detection from images using machine learning techniques: A research review / S. Surana [et al.] // 2022 International Conference on Electronics and Renewable Systems (ICEARS). India, Tuticorin, 2022. P. 1201–1207. DOI: 10.1109/ICEARS53579.2022.9752274
31. Improving intext citation reason extraction and classification using supervised machine learning techniques / I. Ihsan [et al.] // Computer Speech & Language. 2023. Vol. 82, no. 9. P. 101526.

Получено 25.03.2024

Аббаси Мохсин Маншад, к.т.н., доцент кафедры теоретических основ информатики (ТОИ) Удмуртского государственного университета (УдГУ). 426034, Российская Федерация, г. Ижевск, ул. Университетская, 1. Тел.+7 341 291-60-68. E-mail: mohsinmanshadabbasi@gmail.com.

Бельтюков Анатолий Петрович, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой ТОИ УдГУ. 426034, Российская Федерация, г. Ижевск, ул. Университетская, 1. Тел.+7 341 291-60-68. E-mail: belt.udsu@mail.ru.

INTENT EXTRACTION FROM TEXT BY USING GLOBAL FEATURE MATRIX TO IMPROVE MAN MACHINE INTERACTION

Abbasi M.M., Beltikov A.P.

Udmurt State University, Izhevsk, Russian Federation

E-mail: mohsinmanshadabbasi@gmail.com

Interaction between man and machine is the future of technology. Different mechanisms and mediums are used for this interaction such as voice, signals, pictures, videos, text etc. Text is one of the most popular medium of interaction and has gained popularity over past decades. It is used for making predictions of stock market, analysis of people's opinion, identification of group of people with similar interests etc. In this research, the focus is to identify and analyze the intent of the written text and used it to prepare an appropriate machine response to text. There are several systems available that use semi-automatic mechanisms for interaction with humans such as the online customer care services for banks and the telecommunication industry. Different models and algorithms are used for this semi-automatic interaction. This study works on the design of a fully automated system for extracting the intents from the text, prepare an appropriate response and use the intent to do the prediction of the text. The results of the research are detailed in the methodology and experiment sections of the paper.

Keywords: *global matrix, local matrix, confusion matrix, lemmatization, segmentation, text, method and instruments, intent*

DOI: 10.18469/ikt.2023.21.4.11

Abbasi Mohsin Manshad, Udmurt State University, 1, Universitetskaya Street, Izhevsk, 426034, Russian Federation; Associated Professor of Theoretical Foundations of Computer Science Department, PhD in Technical Science. Tel.+7 341 291-60-68. E-mail: mohsinmanshadabbasi@gmail.com

Beltiukov Anatoly Petrovich, Udmurt State University, 1, Universitetskaya Street, Izhevsk, 426034, Russian Federation; Head of Theoretical Foundations of Computer Science Department, Professor, Doctor in Physics & Mathematical Sciences. Tel.+7 341 291-60-68. E-mail: belt.udsu@mail.ru

References

1. Mosteller F., Wallace L.D. Inference in an authorship problem. *Journal of the American Statistical Association*, 1963, vol. 58, no. 302, pp. 275–309.
2. Altmann G., Schwibbe H. *Das Menzerathsche Gesetz in Informations verarbeitenden Systemen*. Hildesheim: Georg Olms Verlag, 1989, 132 p.
3. Hochreiter S., Jrgen S. Long short term memory. *Neural Computation*, 1997, vol. 9, no. 8, pp. 1735–1780.
4. Graves I., Jrgen S. Frame wise phoneme classification with bidirectional LSTM and other neural network architectures. *Neural Networks*, 2005, vol. 18, no. 5, pp. 602–610.
5. Li X., Ye-Yi W., Alex A. Learning query intent from regularized click graphs. *Proceedings of the 31st Annual International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval*, 2008, pp. 339–346.
6. Rehurek R., Sojka P. Software framework for topic modelling with large corpora. *Proceedings of the LREC 2010 Workshop on New Challenges for NLP Frameworks*. Malta, Valletta: Sponsored by European Land Registration Authority (ELRA), 2010, pp. 45–50.

7. Collobert R. et al. Natural language processing (almost) from scratch. *Journal of Machine Learning Research*, 2011, vol. 12, pp. 2493–2537.
8. Jackie C.K., Li X. Sequence clustering and labeling for unsupervised query intent discovery. *Web Search and Data Mining*, 2012, pp. 383–392.
9. Hwang H. et al. Activity inference for constructing user intention model. *Computer Science and Information Systems*, 2013, vol. 10, no. 2, pp. 767–778.
10. Gupta V. et al. Identifying purchase intent from social posts. *Proceedings of the International AAAI Conference on Web and Social Media*, 2014, vol. 8, no. 1, pp. 180–186.
11. Wang J. et al. Mining user intents in Twitter: a semi-supervised approach to inferring intent categories for tweets. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 2015, pp. 318–324.
12. Kooti F. et al. Evolution of conversations in the age of email overload. *24th International World Wide Web Conference*, 2015, pp. 603–613.
13. Hashemi H.B., Siaee A.A., Kraft R. Query intent detection using convolutional neural networks. *Proceedings of WSDM QRUMS Workshop*, 2016, pp. 691–697.
14. Castro D.D. et al. You’ve got mail, and here is what you could do with it!: Analyzing and predicting actions on email messages. *International Conference On Web Search And Data Mining (WSDM 2016)*, 2016, vol. 16, pp. 307–316.
15. Ramarao P. et al. InLook: Revisiting email search experience. *Proceedings of the 39th International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval (SIGIR ’16)*. New York: ACM, 2016, pp. 1117–1120.
16. Sappelli M. et al. Assessing email intent and tasks in email messages. *Information Sciences*, 2016, vol. 358, pp. 1–17.
17. Yang L. et al. Characterizing and predicting enterprise email reply behavior. *Proceedings of the 40th International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval (SIGIR ’17)*. New York: ACM, 2017, pp. 235–244.
18. Beltiukov A.P., Abbasi M.M. Logical analysis of emotions in text from natural language. *Bulletin of Udmurt University. Mathematics. Mechanics. Computer Science*, 2019, vol. 29, no. 1, pp. 106–116.
19. Abbasi M.M., Beltiukov A.P. Identifying the strength of emotions in relation with the topic of text using Word space. *Proceedings of the 21th International Workshop on Computer Science and Information Technologies*. Austria, Vienna: Atlantis, 2019, vol. 3, pp. 1–5.
20. Abbasi M.M. et al. Analysis of emotions from texts for management of society. *Infokommunikacionnye tekhnologii*, 2019, vol. 2, no. 17, pp. 246–254. (In Russ.)
21. Abbasi M.M., Beltiukov A.P. Summarizing emotions from text using Plutchik wheel of emotion. *Proceedings of the 7th All Russian Conference on Information Technology for Intelligent Decision Making Support (ITIDS)*. Ufa, 2019, vol. 166, pp. 291–294.
22. Abbasi M.M., Beltiukov A.P. Analyzing emotions from text corpus using word space. *Proceedings of the 19th International Workshop on Computer Science and Information Technologies (CSIT’2018)*. Varna: Industry 4.0, 2018, pp. 90–94.
23. Abbasi M.M., Beltiukov A.P. Analysis of sentiment and emotion from text written in Russian language. *Informacionnye tekhnologii intellektual’noj podderzhki prinyatiya reshenij (ITIDS’2017): materialy 5 Vserossijskoj konferencii*. Ufa, 2017, vol. 1, no. 1, pp. 42–47. (In Russ.)
24. Abbasi M.M. Tools for emotional analysis of texts in the process of control and modeling in complex systems. *Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnyh sistemah: materialy XX Mezhdunarodnoj konferencii*. Samara, 2018, pp. 236–242. (In Russ.)
25. Abbasi M.M., Beltiukov A.P. Text pre-processing mechanism before sentiment analysis. *Informacionnye tekhnologii intellektual’noj podderzhki prinyatiya reshenij (ITIDS’2018): materialy VI Vserossijskoj konferencii*, Ufa, 2018, pp. 13–17. (In Russ.)
26. Abbasi M.M., Beltiukov A.P. Information technologies for changing the style of text for its emotional modification. *Informacionnye tekhnologii i sistemy: materialy VII Mezhdunarodnoj*

- nauchnoj konferencii*. Hanty-Mansijsk, 2019. pp. 137–142. (In Russ.)
27. Abbasi M.M., Beltiukov A.P. Summarizing emotions from text using Plutchik wheel of emotion. *Proceedings of the 7th All Russian Conference on Information Technology for Intelligent Decision Making Support (ITIDS)*. Ufa, 2019, vol 166, pp. 291–294.
 28. Nisioi S., Bucur A., Liviu P. Lexical analysis and content extraction from customer-agent interactions. *Proceedings of the 2018 EMNLP Workshop WNUT: the 4th Workshop on Noisy User-Generated Text*, 2018, pp. 132–136.
 29. Aljuaid H. et al. Important citation identification using sentiment analysis of intent citations. *Telematics and Informatics*, 2021, vol. 56, pp. 1–16.
 30. Surana S. et al. Text extraction and detection from images using machine learning techniques: A research review. *2022 International Conference on Electronics and Renewable Systems (ICEARS)*. India, Tuticorin, 2022, pp. 1201–1207. DOI: 10.1109/ICEARS53579.2022.9752274
 31. Ihsan I. et al. Improving intent citation reason extraction and classification using supervised machine learning techniques. *Computer Speech & Language*, 2023, vol. 82, no. 9, pp. 101526.

Reseived 25.03.2024

УДК 658.5.012.14

КОНЦЕПЦИЯ ПРИМЕНЕНИЯ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ МАНИПУЛЯЦИОННЫМИ РОБОТАМИ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ СЛОЖНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Борисов В.В., Сивков В.С.

*Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ
E-mail: vitaliy.borisov.2000@inbox.ru, sivkov-vs@psuti.ru*

Статья посвящена изучению алгоритмов управления манипуляционными роботами для выполнения сложных технологических операций на предприятии с целью оптимизации продолжительности рабочего процесса. В современной бизнес-среде для достижения максимальной эффективности управления производством в условиях жесткой конкуренции предприятиям необходимо постоянно совершенствовать способы автоматизации рабочих процессов с помощью роботов и искусственного интеллекта. Авторы статьи подробно рассматривают реальные проблемы, с которыми сталкиваются манипуляционные роботы при выполнении сложных операций в промышленной среде. В статье рассматриваются различные подходы к управлению манипуляционными роботами. К таким подходам относятся метод адаптивного управления, метод программного управления, метод сенсорного управления, метод коллаборативного управления. Применение искусственного интеллекта в управлении манипуляционными роботами позволяет принимать решения на основе анализа большого объема данных, обучаться на полученном опыте и адаптироваться к условиям окружающей среды.

Ключевые слова: алгоритмы управления, манипуляционные роботы, метод программного управления, метод адаптивного управления, метод сенсорного управления, метод коллаборативного управления, программные модули

Введение

Современная промышленность вступила в эру цифровой трансформации, где автоматизация играет ключевую роль в повышении эффективности и конкурентоспособности производства. Использование манипуляционных роботов, оснащенных передовыми алгоритмами управления, становится неотъемлемой частью производственных процессов. Концепция применения алгоритмов управления манипуляционными роботами для выполнения сложных технологических операций является актуальным исследовательским направлением, нацеленным на разработку и оптимизацию методов

и алгоритмов контроля и координации движений роботов в промышленной среде.

В данной статье рассматриваются как классические методы управления, так и инновационные подходы, включая точные алгоритмы, основанные на применении современных программных комплексов. К классическим методам управления относятся: метод адаптивного управления, метод программного управления, метод сенсорного управления, метод коллаборативного управления. Применение адаптивных алгоритмов управления роботами на производстве дает значительные преимущества, такие как повышение точности и ско-

рости выполнения операций, снижение затрат на обслуживание и настройку систем, а также возможность интеграции роботов в гибкие и адаптивные производственные системы.

Оптимизация технологических процессов на предприятии является ключевой задачей для успешного функционирования и развития бизнеса. Концепция бережливого производства предполагает оптимальное использование всех ресурсов, максимизацию производительности, минимизацию затрат и достижение наилучших результатов в рамках поставленных целей. Основная цель бережливого производства заключается в устранении потерь и увеличении эффективности производства за счет сокращения запасов, уменьшения времени производственного цикла и повышения качества продукции. Использование концепции бережливого производства на предприятии способствует сокращению периодов простоя оборудования и расширению производственных мощностей.

Внедрение новых технологий и методов управления манипуляционными роботами на производстве дает возможность наиболее грамотно распределять ресурсы и рабочее время персонала.

Анализ методик управления

1. Метод адаптивного управления. Метод адаптивного управления манипуляционными роботами – это стратегия управления, которая позволяет роботам адаптироваться к изменяющимся условиям и требованиям в процессе выполнения производственных задач. Данный метод подразумевает использование различных алгоритмов и техник, которые позволяют роботам обучаться на основе полученной информации и корректировать свое поведение в соответствии с текущей ситуацией.

Например, есть промышленный завод по производству видеокарт. В процессе производства возникает проблема точечной сборки изделий, состоящих из мелких деталей. Предположим, на заводе есть несколько станций по сборке видеокарт, и каждая станция оснащена манипуляционным роботом. Эти роботы могут выполнять различные операции, такие как установка микросхем, пайка, установка охлаждающих систем и тестирование готовой продукции.

Использование метода адаптивного управления для решения данной задачи включает нескольких этапов.

Этап 1. Сбор аналитических данных. На этом этапе собираются данные о процессах производства видеокарт и используемых ресурсах для их производства: технические параметры видеокарты, детали для производства видеокарты, данные о со-

стоянии оборудования и системы автоматизации.

Этап 2. Анализ данных и разработка стратегии адаптивного управления. Полученные данные анализируются с целью выявления узких мест, неэффективных процессов или возможных улучшений. На данном этапе происходит выявление паттернов в работе роботов, идентификация ошибок и несоответствий в производственных процессах. На основе анализа данных разрабатываются стратегии адаптивного управления. Это могут быть алгоритмы оптимизации работы роботов, автоматическая коррекция параметров работы или динамическое перераспределение ресурсов в зависимости от текущих условий производства.

Этап 3. Внедрение алгоритмов и систем управления. Разработанные стратегии адаптивного управления реализуются на практике. Обычно на этом этапе происходит внедрение специального программного обеспечения, а также обновление аппаратного обеспечения манипуляционных роботов.

Результаты использования метода адаптивного управления включают в себя:

- повышение точности сборки продукции;
- экономия производственных ресурсов и времени;
- гибкое и адаптивное управление производственными процессами;
- сокращение времени простоя оборудования;
- минимизация трудозатрат.

2. Метод программного управления. Программное управление манипуляционным роботом осуществляется с использованием заранее разработанных управляющих программ, аналогично тому, как это происходит в случае станков с числовым программным управлением (ЧПУ).

Реализация метода программного управления: в первую очередь проводится анализ предполагаемой задачи и сбор первичных данных. На этом этапе определяются требования к задаче и ее цели. Определяется тип робота, набор необходимых функций, параметры окружающей среды. Далее определяются оптимальные алгоритмы взаимодействия со специализированными программными системами для координации действий манипуляционных роботов с целью выполнения конкретной производственной задачи. Перечень алгоритмов управления роботами на производстве может включать в себя:

- алгоритм планирования движений: генерация оптимальных траекторий движений робота с учетом ряда факторов, таких как кинематика робота и ограничение рабочей области;
- алгоритм оптимального управления: поиск оптимальных управляющих сигналов с учетом

критериев оптимальности, таких как минимизация времени производства, энергопотребления, а также износа составных деталей;

- алгоритм координации действий множества манипуляционных роботов: распределение задач между несколькими роботами для достижения максимальной эффективности и синхронности.

Пример применения: рассмотрим производственную линию для сборки сложных электронных устройств, например, современных смартфонов. В первую очередь, производится программирование роботов для выполнения задач по сборке устройств, состоящих из мелких деталей. Для этого инженерами создается специализированное программное обеспечение, с помощью которого определяются точки подачи каждого компонента на конвейере. Затем разработанное программное обеспечение дополняется модулями, позволяющими генерировать оптимальные траектории для перемещения деталей от точки к точке, минимизируя при этом энергозатраты и время сборки одного устройства. После прохождения вышеописанных этапов выполняется интеграция с производственной линией. Программное обеспечение интегрируется с системой управления производственными процессами (MES) с целью синхронизации действий робота с другими производственными операциями. После этого манипуляционный робот может запускаться и останавливаться в соответствии с требованиями производственной линии. Заключительным этапом является внедрение системы мониторинга и оптимизации, корректирующей планы движения при необходимости, например, если робот сталкивается с препятствием.

3. Метод сенсорного управления. Сенсорное управление манипуляционными роботами на производстве основывается на внедрении и использовании различных типов сенсоров для четкого восприятия окружающей среды, а также для получения обратной связи о выполнении поставленных задач. Суть данного метода заключается в том, чтобы позволить роботам адаптироваться к изменяющимся условиям на производстве в режиме реального времени. Метод сенсорного управления включает в себя следующие аспекты:

- применение датчиков и сенсоров для восприятия роботами окружающей среды в режиме реального времени: ИК-датчики, лидары, ультразвуковые датчики, датчики силы;
- обработка сенсорной информации: данные, полученные от сенсоров обрабатываются с помощью специализированных алгоритмов обработки сигналов и компьютерного (машинного) зрения;
- использование адаптивного управления: сенсорное управление позволяет роботам адапти-

роваться к изменениям окружающей среды в условиях выполняемой задачи в режиме реального времени, например, если положение объекта изменяется, или появляются новые препятствия, робот может повторно просчитать свои действия и продолжить выполнение поставленной задачи.

Пример применения: рассмотрим производственную линию по сборке автомобильных кузовов. Для сборки отдельных компонентов крупной кузовной детали необходимо использовать манипуляционного робота. Робот оснащен камерой с компьютерным зрением и сенсорными датчиками, используемыми для обнаружения и распознавания кузовных панелей, которые поступают на производственную линию. Прежде всего, происходит обработка изображений с камеры для определения положения и ориентации кузовных панелей на конвейере. Далее, на основе данных, полученных с камеры и датчиков, робот может выбрать алгоритм их обработки и скорректировать свое положение и ориентацию в пространстве таким образом, чтобы правильно захватить кузовную панель. Если кузовная панель расположена на конвейере не так, как ожидалось, можно использовать информацию о новом положении детали в режиме реального времени.

4. Метод коллаборативного управления. Суть метода коллаборативного управления заключается в обеспечении взаимодействия между манипуляционными роботами и человеком в процессе выполнения различных технологических задач на предприятии. Данный метод позволяет решать следующие производственные задачи:

- обеспечение взаимодействия между различными роботами для выполнения сложных технологических задач;
- обеспечение взаимодействия между роботами и человеком: совместная работа с операторами или другим персоналом производственных предприятий позволяет наиболее эффективно решать поставленные задачи;
- возможность решать нетривиальные производственные задачи, обмениваясь информацией и синхронизируя действия робота и человека в режиме реального времени;
- адаптация к изменениям на производстве: данный метод позволяет роботам адаптироваться к изменяющимся условиям производства и требованиям в зависимости от текущей ситуации;
- возможность использовать вышеописанные методы для достижения наилучших результатов;
- использование современных систем безопасности: коллаборативное управление включает в себя системы безопасности, которые обеспечивают безопасное взаимодействие между роботами и

персоналом предприятия, например, роботы могут быть оснащены датчиками безопасности, которые обнаруживают присутствие людей в определенной зоне и автоматически останавливают свои действия для предотвращения аварийных ситуаций и несчастных случаев на производстве.

Концепция создания каркаса (framework) методик управления

Исходя из результатов, приведенных выше, авторы предлагают концепцию создания так называемого каркаса (англ. термин *framework*) методик управления для формирования наиболее эффективного подхода в области управления роботами, используя рассмотренные выше методики в качестве базовых.

Архитектура такого каркаса представлена на рисунке 1.

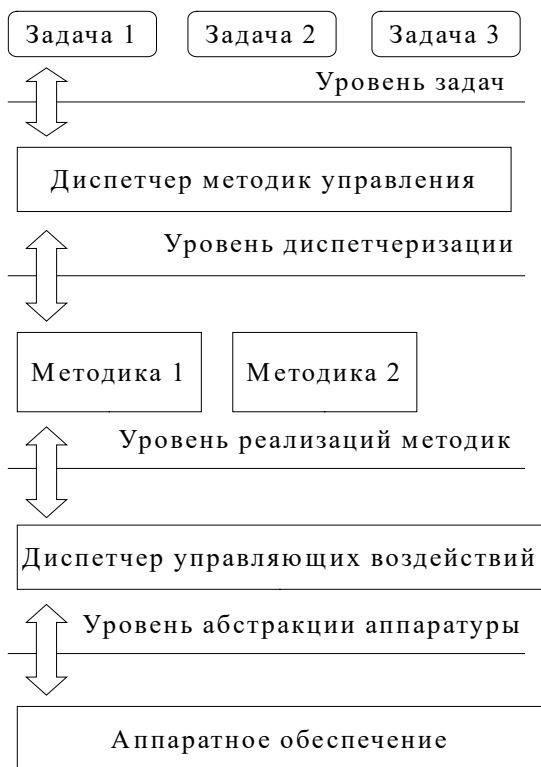


Рисунок 1. Архитектура каркаса методик управления

Структура каркаса многослойная, что позволяет достаточно просто решать задачи по масштабированию систем управления на основе такой архитектуры.

Первый уровень архитектуры – список задач, которые формируются пользователями системы. Задачи поступают на вход диспетчера методик управления, который занимается подбором наиболее эффективной методики под данную задачу.

Диспетчер методик управления работает с сервисами методик управления. Каждый сервис методики управления представляет собой модель обработ-

ки данных, поступающих от задач, и от аппаратного обеспечения (датчиков, актуаторов и т.д.).

Сформированные команды управления поступают на диспетчер управляющих воздействий, который выполняет роль уровня абстракции от аппаратного обеспечения. Такая конструкция позволяет с одной стороны использовать единый универсальный формат взаимодействия с аппаратурой, со стороны сервисов методик. С другой стороны, такой подход упрощает добавление новых типов аппаратного обеспечения (новых типов датчиков, актуаторов и т.д.).

Реализация данного каркаса для системы управления роботами-манипуляторами может быть выполнена на базе кластера из вычислительных устройств, причем важную роль в организации такого кластера будут играть правильно подобранные компоненты в виде операционных систем и средств взаимодействия внутри кластера. На рисунке 2 представлен возможный вариант распределения уровней архитектуры каркаса методик управления.

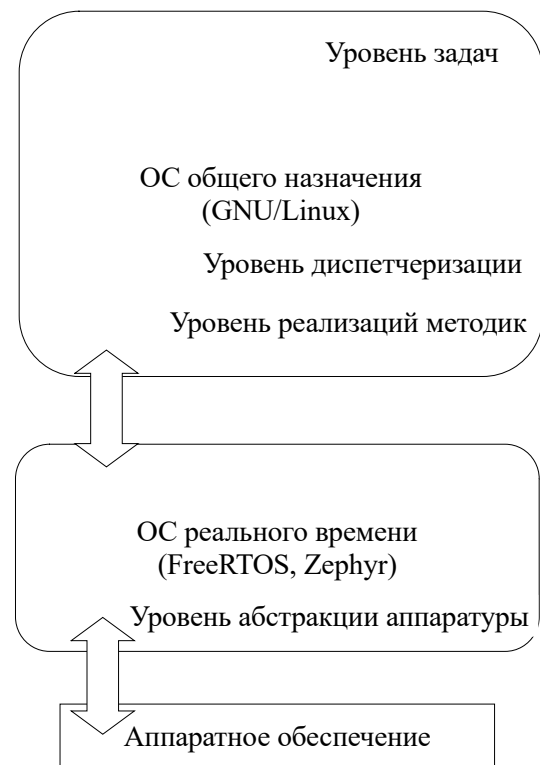


Рисунок 2. Распределение уровней архитектуры каркаса

На рисунке видно, что задачи непосредственного управления роботами, а также сбор информации с датчиков может быть выполнен на базе специализированных систем реального времени. Тогда как цели диспетчеризации задач и реализации методик управления могут быть достигнуты с использованием операционных систем общего назначения. Однако такое распределение не является обязательным условием реализации каркаса — сама архитек-

Таблица 1. Преимущества методов управления манипуляционными роботами на производстве

Метод	Преимущества применения
Метод адаптивного управления	1. Применение адаптивных алгоритмов для управления производственными мощностями. 2. Оптимальное распределение энергоресурсов и времени производства. 3. Высокая точность сборки и низкие трудозатраты персонала. 4. Наиболее эффективное использование оборудования на конвейере.
Метод программного управления	1. Адаптивность и гибкость: применение алгоритмов планирования для генерации оптимальных траекторий движения робота с учетом факторов окружающей среды. 2. Оптимальное управление и прогнозирование: поиск оптимальных управляющих сигналов и возможность прогнозирования движений в изменяющихся условиях производства. 3. Координация движений и распределение производственных задач между несколькими роботами.
Метод сенсорного управления	1. Использование ИК-датчиков, сенсоров и компьютерного зрения для точного определения параметров окружающей среды с целью повышения эффективности работы роботов в режиме реального времени. 2. Сокращение времени сборки высокотехнологичных устройств за счет использования метода адаптивного управления. 3. Улучшенная безопасность: возможность быстро реагировать на опасные изменения окружающей среды.
Метод коллаборативного управления	1. Возможность решать нетривиальные производственные задачи, обмениваясь информацией и синхронизируя действия манипуляционных роботов и человека в режиме реального времени. 2. Применение нескольких методов управления роботами для достижения более высокой точности сборки и повышения производительности оборудования.

тура предполагает гибкое маневрирование в плане распределения уровней архитектуры по конкретным вычислительным устройствам.

Заключение

Применение описанных выше методов на предприятиях по производству высокотехнологичных технических систем с ориентацией на широкий рынок сбыта, представляется обоснованным. Концепция использования так называемого каркаса методик по оценочным прогнозам позволит сократить временные затраты на промышленных предприятиях по сборке сложных высокотехнологичных устройств в среднем на 20%. Затраты по части ресурсов производства на данных предприятиях сокращаются в среднем на 15%. Кроме того, такой подход к управлению манипуляционными роботами позволяет снизить затраты на установку новых роботизированных комплексов, и проектирование на них программ управления. Результатом применения этих методов является повышение общей эффективности производственных процессов, улучшение качества сборки продукции, а также повышение конкурентоспособности предприятия в отдельных отраслях производства.

Литература

1. Архипов М.В., Головин В.Ф., Вжеснев-

ский В.А. Человеко-машинный интерфейс манипуляционного робота // Экстремальная робототехника. 2017. Т. 1, № 1. С. 110–119.

2. Белянин П.Н. Состояние и развитие техники роботов // Проблемы машиностроения и надежность машин. 2000. № 2. С. 85–96.
3. Бурдаков С.Ф., Дьяченко В.А., Тимофеев А.Н. Проектирование манипуляторов промышленных роботов и роботизированных комплексов: учеб. пособие для вузов. М.: Высшая школа, 1986. 264 с.
4. Волошко А.Г., Ивутин А.Н., Крюков О.С. Методы моделирования и анализа производственных процессов для разработки стратегии модернизации предприятия // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. № 12. С. 36–44.
5. Горностаев И.В. Разработка методов синтеза систем высокоскоростного управления манипуляционными роботами с учетом особенностей их конструкций: дис. ... канд. техн. наук. Владивосток, 2023. 145 с.
6. Зенкевич С.Л., Ющенко А.С. Управление роботами. Основы управления манипуляционными роботами: учеб. пособие для вузов. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. 478 с.
7. Капустян С.Г. Методы и алгоритмы коллек-

- тивного управления роботами при их групповом применении: дис. ... д-ра техн. наук. Таганрог, 2008. 376 с.
8. Колпашиков Е.В., Перепелкин Е.А. Программное обеспечение для разработки адаптивных систем управления промышленными роботами // Программно-техническое обеспечение автоматизированных систем. 2019. Т. 3, № 5. С. 82–84.
 9. Колтыгин Д.С., Седельников И.А., Ульянов А.Д. Разработка методики моделирования рабочих зон манипуляционных роботов // Автоматизация в промышленности. 2022. № 4. С. 25–29.
 10. Наумова Т.М., Шлычков Д.С. Контроллинг в производственных процессах организации // Балканское научное обозрение. 2020. Т. 4, № 4 (10). С. 62–65.
 11. Огородников И.И., Зейн М. Техническое зрение для детектирования спелых плодов роботизированной системой // Автоматизация в промышленности. 2022. № 10. С. 40–43.
 12. Смородов А.В. Анализ и синтез манипуляционных роботов с механизмами параллельной структуры: дис. ... канд. техн. наук. СПб, 2004. 139 с.
 13. Токарев Д.Г., Францева Ю.А. Аппаратно-программное обеспечение модернизированной системы управления роботом // Символ науки: международный научный журнал. 2017. Т. 2, № 4. С. 102–105.
 14. Адаптивные захватные устройства в технологическом производстве упаковки / П.Н. Харитонов [и др.] // Интеллектуальные системы и технологии в отраслях пищевой промышленности. 2019. № 4. С. 164–170.
 15. Швандт А., Ющенко А.С. Программирование коллаборативных манипуляционных роботов с использованием интерфейса дополненной реальности // Робототехника и техническая кибернетика. 2020. Т. 8, № 2. С. 139–149.
 16. Шестаков Е.И., Жданов А.А. Управление модульным манипуляционным роботом на основе метода автономного адаптивного управления // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2022. Т. 24, № 6. С. 38–45.

Получено 06.05. 2024

Борисов Виталий Валериевич, магистрант кафедры управления в технических системах (УТС) Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ). 443090, Российская Федерация, г. Самара, Московское шоссе, 77. Тел. +7 927 339-11-00. E-mail: vitaliy.borisov.2000@inbox.ru

Сивков Вадим Сергеевич, к.т.н., доцент кафедры УТС ПГУТИ. 443090, Российская Федерация, г. Самара, Московское шоссе, 77. Тел. +7 927 339-11-00. E-mail: sivkov-vs@psuti.ru

CONCEPT OF APPLICATION OF CONTROL ALGORITHMS FOR MANIPULATION ROBOTS TO PERFORM COMPLEX TECHNOLOGICAL OPERATIONS IN INDUSTRY

Borisov V.V., Sivkov V.S.

Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russian Federation

E-mail: vitaliy.borisov.2000@inbox.ru, sivkov-vs@psuti.ru

The article is devoted to the study of control algorithms for manipulation robots to perform complex technological operations at enterprises in order to optimize working process time. In today's business environment, in order to maximize efficiency of production management in highly competitive environment, enterprises need to constantly improve work process automating methods using robots and artificial intelligence. Authors of this article take an in-depth look at the real-world challenges that manipulation robots face in performing complex operations in industrial environment. The work discusses various approaches to control manipulation robots. These approaches include adaptive control method, program control method, sensor control method and collaborative control method. Application of artificial intelligence in the control of manipulation robots allows making decisions based on analyzing of large amounts, learning from experience and adapting to the environment.

Keywords: *control algorithms, manipulation robots, program control method, adaptive control method, sensor control method, collaborative control method, software modules*

DOI: 10.18469/ikt.2023.21.4.12

Borisov Vitaliy Valerievich, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 77, Moskovskoe shosse, Samara, 443090, Russian Federation; Master's Student of Management in Technical Department. Tel. +7 927 339-11-00. E-mail: vitaliy.borisov.2000@inbox.ru

Sivkov Vadim Sergeevich, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 77, Moskovskoe shosse, Samara, 443090, Russian Federation; Associated Professor of Management in Technical Department, PhD in Technical Science. Tel. +7 927 339-11-00. E-mail: sivkov-vs@psuti.ru

References

1. Arkhipov M.V., Golovin V.F., Vzhesnevskiy V.A. Human-machine interface of the manipulation robot. *Extreme Robotics*, 2017, vol. 1, no. 1, pp. 110–119. (In Russ.)
2. Belyanin P.N. State and development of robot technology. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnost' mashin*, 2000, no. 2, pp. 85–96. (In Russ.)
3. Burdakov S.F., Dyachenko V.A., Timofeev A.N. *Design of manipulators of industrial robots and robotised complexes: Textbook for Universities*. Moscow: Vysshaya shkola, 1986, 264 p. (In Russ.)
4. Voloshko A.G., Ivutin A.N., Kryukov O.S. Methods for modeling and analysis of production processes for developing an enterprise modernization strategy. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2020, no. 12, pp. 36–44. (In Russ.)
5. Gornostaev I.V. Development of synthesis methods of the high-speed control systems for manipulation robots taking into account the peculiarities of their constructions: diss. ... cand. tech. sciences. Vladivostok, 2023, 145 p. (In Russ.)
6. Zenkevich S.L., Yushchenko A.S. *Robot Control. Fundamentals of manipulation robots control: Textbook for Universities*. Izdatel'stvo MGTU im. N.E. Baumana, 2000, 478 p. (In Russ.)
7. Kapustyan S.G. Methods and algorithms of collective control of robots at their group application: diss. ... doct. tech. sciences. Taganrog, 2008, 376 p. (In Russ.)
8. Kolpashchikov E.V., Perepolkin E.A. Software for the development of adaptive control systems for industrial robots. *Programmno-tekhnicheskoe obespechenie avtomatizirovannyh system*, 2019, vol. 3, no. 5, pp. 82–84. (In Russ.)
9. Koltygin D.S., Sedelnikov I.A., Ulyanov A.D. Development of the methodology for modelling the working zones of the manipulation robots. *Avtomatizaciya v promyshlennosti*, 2022, no. 4, pp. 25–29. (In Russ.)
10. Naumova T.M., Shlychkov D.S. Controlling in the production processes of the organization. *Balkanskoe nauchnoe obozrenie*, 2020, vol. 4, no. 4 (10), pp. 62–65. (In Russ.)
11. Ogorodnikov I.I., Zain M. Technical vision for ripe fruit detection by a robotic system. *Avtomatizaciya v promyshlennosti*, 2022, no. 10, pp. 40–43. (In Russ.)
12. Smorodov A.V. Analysis and synthesis of manipulation robots with mechanisms of parallel structure: diss. ... cand. tech. sciences. Saint Petersburg, 2004, 139 p. (In Russ.)
13. Tokarev D.G., Frantseva Y.A. Hardware and software support of the modernised robot control system. *Simvol nauki: mezhdunarodnyj nauchnyj zhurnal*, 2017, vol. 2, no. 4, pp. 102–105. (In Russ.)
14. Kharitonova P.N. et al. Adaptive gripping devices in the technological production of packaging. *Intellektual'nye sistemy i tekhnologii v otraslyah pishchevoj promyshlennosti*, 2019, no. 4, pp. 164–170. (In Russ.)
15. Schwandt A., Yushchenko A.S. Collaborative manipulation robots programming with the use of augmented reality interface. *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika*, 2020, vol. 8, no. 2, pp. 139–149. (In Russ.)
16. Shestakov E.I., Zhdanov A.A. Control of a modular robot manipulator based on the method of autonomous adaptive control. *Neurocomputers: development, application*, 2022, vol. 24, no. 6, pp. 38–45. (In Russ.)

Received 06.05.2024

НА ПЕРЕКРЕСТКЕ ТЕХНОЛОГИЙ И МЕДИЦИНЫ: ПЕРСПЕКТИВЫ АВТОМАТИЗАЦИИ В МЕДИЦИНСКОЙ ПРАКТИКЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЙРОСЕТЕЙ

Белов К.С., Харитонов А.С., Чернова С.В.

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ

E-mail: frozent.03@mail.ru

Применение нейронной сети в медицине является на сегодняшний день одним из наиболее перспективных направлений развития здравоохранения. Автоматизация процессов и замена человека на более эффективные и точные инструменты уже активно рассматривается сегодня, и даже используется в области медицинской диагностики и лечения. Однако такие системы также нуждаются в испытании на официальных медицинских тестах, для того, чтобы можно было оценить их эффективность и точность систем. Поэтому в данной статье исследуется эффективность работы нейронной сети, на примере прохождения испытания с официальными медицинскими тестами. Сравниваются результаты прохождения теста нейронной сетью, с результатами, полученными от реальных людей. В заключении подчеркивается, что автоматизация и замена человека в сфере медицины открывают новые возможности для повышения качества и эффективности медицинского обслуживания, что является важным шагом в развитии здравоохранения.

Ключевые слова: медицина, технологии, нейросети, система, диагностика

Введение

Актуальность темы исследования связана с развитием современных технологий. В последние десятилетия нейронные сети стремительно ворвались в различные сферы нашей жизни, став ее неотъемлемой частью, и медицина тут не стала исключением. С использованием передовых технологий искусственного интеллекта, в частности нейросетей, медицинская наука стоит перед новыми перспективами автоматизации и замены человека.

Целью исследования является изучение перспективы замены человека нейросетями, а также выгоды и вызовы, которые могут возникнуть на этом пути.

Успехом нашего исследования будет получение данных, по которым можно будет сделать выводы о современных нейросетях, их возможностях и перспективах на данный момент времени.

Возможные сферы применения

1. Диагностика заболеваний. С помощью нейронных сетей можно разработать системы, которые будут самостоятельно анализировать медицинские данные пациентов, такие как результаты оценки состояния здоровья, симптомы, диагнозы. Это может помочь ускорить процесс диагностики и повысить точность конечных выводов [3].

2. Разработка лекарственных средств. Нейронные сети могут быть использованы для прогнозирования взаимодействия между различными химическими соединениями и поиска новых лекарственных препаратов. Это может ускорить процесс разработки новых лекарств и помочь снизить затраты на исследования [2].

3. Мониторинг пациентов. Нейронные сети могут быть обучены обрабатывать и анализировать

данные о состоянии пациента, такие как сердечный ритм, уровень сахара в крови, давление и т.д. Они могут автоматически предупреждать медицинский персонал о возможных проблемах или изменениях в состоянии здоровья пациента [4].

4. Автоматизация хирургических процедур.

Нейронные сети могут быть использованы для управления роботизированными системами во время проведения хирургических операций. Это может помочь повысить точность и снизить риск совершения ошибок [4].

5. Поддержка пациентов.

Нейронные сети могут быть использованы для создания виртуальных ассистентов, которые будут отвечать на вопросы пациентов, предоставлять информацию о заболеваниях и лечении, а также давать рекомендации по улучшению состояния здоровья [4].

Это лишь некоторые примеры того, как нейронные сети могут заменить или облегчить работу человека в сфере медицины. Однако необходимо учесть, что человеческий фактор и экспертное мнение врачей играют в медицине важную роль, и нейросети не могут полностью заменить человека во всех аспектах.

Перспективы автоматизации и замены человека в медицине представляют огромный потенциал для совершенствования сферы здравоохранения и достижения лучших результатов лечения. Нейросети могут стать незаменимыми помощниками врачей, сокращая риски и оптимизируя процессы. Однако, эти перспективы влекут за собой необходимость внимательного регулирования и соблюдения этических принципов. Важно, чтобы эти передовые технологии служили исключительно для блага пациентов и медицинской науки [5].

Все вышесказанное подразумевало возмож-

ность использования нейросетей в ближайшем будущем, однако развитие технологий позволяет нам исследовать их потенциал уже сейчас [9].

Проверка нейросети по тесту USMLE

Рассмотрим, как справляется нейросеть с предоставленными ей задачами. В нашей работе мы будем использовать искусственный интеллект под названием GPT-3 (Generative Pre-trained Transformer 3) или, как он больше известен, ChatGPT разработанный OpenAI. Это большая языковая модель, которая использует крупный объем тренировочных данных для генерации естественных языковых ответов на текстовый ввод в контексте беседы. Она особенно эффективна в работе с долгосрочными зависимостями и создании согласованных и контекстуально подходящих ответов. ChatGPT – это модель языка, содержащаяся на сервере, которая не способна просматривать интернет или выполнять поисковые запросы в сети. Поэтому все ответы генерируются на месте, на основе абстрактных связей между словами в нейронной сети [1].

Нашим испытанием будет служить тест USMLE (United States Medical Licensing Examination, Экзамен на медицинское лицензирование в Соединенных Штатах), который считается одним из наиболее сложных на знание медицины. Этот экзамен охватывает широкий спектр медицинских знаний и оценивает понимание основных научных принципов, анатомии, биохимии, фармакологии, патологии, микробиологии и других областей медицины. USMLE является одним из самых длительных и трудоемких экзаменов, и для его сдачи требуется обширная подготовка и отличное знание предмета. Он состоит из более, чем 280 вопросов и делится на три раздела:

1. USMLE Уровень 1 (USMLE Step 1)[6]:

1.1 Цель. Оценка основных научных и медицинских знаний.

1.2 Содержание. В этом разделе обычно оцениваются основы биологии, биохимии, физиологии, фармакологии и других предметов, связанных с медициной.

1.3 Формат. Множественный выбор, включая некоторые вопросы с одним верным ответом и вопросы с несколькими верными ответами.

2. USMLE Уровень 2 (USMLE Step 2)[7]:

2.1 Цель. Оценка навыков клинической практики.

2.2 Содержание. Этот раздел делится на две части: Уровень 2 СК оценивает клинические знания, а Уровень 2 CS оценивает навыки взаимодействия с пациентами и клинические навыки.

2.3 Формат. Уровень 2 СК – множественный вы-

бор и клинические ситуации; Уровень 2 CS – структурированные клинические экзамены.

3. USMLE Уровень 3 (USMLE Step 3)[8]:

3.1 Цель. Оценка способности врача принимать независимые клинические решения.

3.2 Содержание. Включает в себя разнообразные клинические ситуации, оценивающие способность врача диагностировать и лечить пациентов.

3.3 Формат. Множественный выбор, клинические ситуации, исследования и структурированные клинические экзамены.

Количество правильных ответов, необходимых для сдачи, зависит от текущего процента верных ответов. Обычно для сдачи экзамена необходимо набрать около 60-70% правильных ответов. Среднее время сдачи USMLE экзамена составляет около 9 часов.

Рассмотрим вводные данные, которые мы предоставим нашему боту: 376 публично доступных тестовых вопросов были взяты из выпуска образцового экзамена июня 2022 года, названного USMLE-2022, и были получены с официального веб-сайта USMLE. Поэтому все входные данные представляют собой настоящие образцы внеучебных данных для модели GPT3. После фильтрации было передано 350 элементов USMLE (Уровень 1: 119, Уровень 2СК: 102, Уровень 3: 122).

Вопросы были отформатированы в три варианта и введены в ChatGPT в следующей последовательности.

Открытый вопрос – Создан путем удаления всех вариантов ответа и добавления вариативной вступительной вопросительной фразы. Этот формат имитирует свободный ввод и естественный запрос пользователя. Примеры включают: «Каков будет диагноз пациента на основе предоставленной информации?» или «По вашему мнению, в чем причина асимметрии зрачка у пациента?».

Множественный выбор с одним ответом без обязательного обоснования: Создан путем воспроизведения исходного вопроса USMLE дословно. Примеры включают: «Какой из следующих вариантов будет представлять собой наиболее подходящий следующий этап лечения?» или «Состояние пациента, в основном, обусловлено каким из следующих патогенов?».

Множественный выбор с единственным ответом с обязательным обоснованием подразумевает добавление вопросительной фразы или повелительного наклонения, обязывающих ChatGPT обосновать каждый вариант ответа. Примеры включают в себя: «Какая из перечисленных причин наиболее вероятна для ночных симптомов пациента? Объясните свои аргументы по каждому варианту ответа»

или «Наиболее подходящая фармакотерапия для этого пациента, скорее всего, действует по какому из следующих механизмов? Почему другие варианты неверны?»).

Приступим к выполнению теста. Для уменьшения искажения ответов была начата новая сессия чата в ChatGPT для каждого вопроса. Это означает, что все они были заданы без начального предложения или контекста.

Первые элементы экзамена были представлены в виде открытых вопросов. Этот формат ввода имитирует свободный естественный запрос пользователя. Правильность ответов ChatGPT для USMLE Уровень 1, 2СК и 3 составила соответственно 75,0%, 61,5% и 68,8%.

Затем элементы экзамена были представлены как множественный выбор с одним ответом без принудительного обоснования. Этот формат ввода представляет собой дословный формат вопроса, представленный тестирующимся. Правильность ответов ChatGPT для USMLE Уровень 1, 2СК и 3 составила 55,8%, 59,1% и 61,3% соответственно.

Наконец, элементы были даны как множественный выбор с одним ответом с принудительным обоснованием положительных и отрицательных выборов. Этот формат ввода имитирует поиск информации в поведении пользователя. Правильность ответов ChatGPT составила 64,5%, 52,4% и 65,2% соответственно.

Затем, врачом-хирургом с первой квалификационной категорией и дипломом по специальности «Лечебное дело» в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Самарский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации, были оценены соответствия ответов путем анализа содержания объяснений. В целом, ChatGPT выдал ответы и объяснения с согласованностью на уровне 94,6% для всех вопросов, что значит, при просьбе пояснить свой ответ мы сможем увидеть обоснованное объяснение. Высокая степень глобальной согласованности сохранялась на всех уровнях экзамена и для всех форм ввода вопросов.

Дальше мы проанализировали взаимосвязь между правильностью и соответствием в ответах. ChatGPT был вынужден обосновать свой выбор и защитить свое отклонение от альтернативных вариантов. Согласованность среди точных ответов была практически идеальной и значительно выше, чем среди неточных ответов (99,1% против 85,1%).

Анализ результатов

Анализируя результаты, можно заметить, что процент правильных ответов на вопросы, требую-

щих развернутого описания выше, чем у вопросов с вариантами ответа. Но самое главное, что общий процент верных ответов для всех разделов равен 62,62%, что является достаточным показателем прохождения теста. Но разве такой процент является достаточным, чтобы мы могли доверить нейросетям нашу жизнь?

В этом исследовании, которое проходило на протяжении двух недель, мы предоставляем доказательства того, что ChatGPT способен выполнять несколько сложных задач, связанных с обработкой сложной медицинской и клинической информации. Чтобы оценить возможности ChatGPT в решении биомедицинских и клинических вопросов стандартизированной сложности, мы протестировали его эксплуатационные характеристики на экзамене по медицинскому лицензированию в Соединенных Штатах (USMLE).

Выводы

Выводы можно разделить на две основные темы: Растущая точность ChatGPT, которая приближается к пороговому значению USMLE, или превышает его, может свидетельствовать о возможном будущем, где мы будем доверять наши жизни машинам, а потенциал искусственного интеллекта для генерации новых идей, которые могут помочь учащимся в условиях медицинского образования, становится все выше.

Однако сейчас еще слишком рано говорить о полной замене человека. Пока есть хоть один шанс того, что искусственный интеллект может ошибиться, люди не смогут доверять машинам без участия человека [10].

Литература

1. Кан К. Нейронные сети. Эволюция. Самиздат, 2020. 76 с.
2. Фершт В.М., Латкин А.П., Иванова В.Н. Современные подходы к использованию искусственного интеллекта в медицине // Территория новых возможностей. Вестник Владивостокского государственного университета экономики и сервиса. 2020. Т. 12, № 1. С. 121–130.
3. Ifeachor E.C., Sperduti A., Starita A. Neural networks and expert systems in medicine and healthcare // Proceedings of The Third International Conference. World Scientific Publishing Company, 1998. 368 p.
4. Тополь Э. Искусственный интеллект в медицине: Как умные технологии меняют подход к лечению. Москва: Альпина Паблишер, 2022. 398 с.

5. Казанцев Т. ChatGPT и Революция Искусственного Интеллекта. Самиздат, 2023. 150 с.
6. Kaplan Medical. USMLE Step 1. Lecture Notes. URL: <https://silo.pub/kaplan-usmle-step-1-lecture-notes-2009-2010-behavioral-sciences.html> (дата обращения: 16.05.2024).
7. Kaplan Medical. USMLE Step 2 CK Qbook. Lecture Notes. URL: <https://silo.pub/kaplan-lecture-notes-step-2-ck.html> (дата обращения: 16.05.2024).
8. Kaplan Medical. USMLE Master the Boards. Step 3. URL: <https://silo.pub/kaplan-medical-usmle-master-the-boards-step-3.html> (дата обращения: 16.05.2024).
9. Душкин Р. Искусственный интеллект. М.: ДМК Пресс, 2022. 28 с.
10. Николенко С.И., Кадурин А.А., Архангельская Е.О. Глубокое обучение. СПб: Питер, 2017. 480 с.

Получено 27.11.2023

Белов Кирилл Сергеевич, студент кафедры информатики и вычислительной техники (ИВТ) Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ). 443090, Российская Федерация, г. Самара, Московское шоссе, 77. Тел. +7 964 980-06-79. E-mail: frozent.03@mail.ru

Харитонов Александр Сергеевич, студент кафедры ИВТ ПГУТИ. 443090, Российская Федерация, г. Самара, Московское шоссе, 77. Тел. +7 939 711-04-49. E-mail: sasha2030203020302030@mail.ru

Чернова Светлана Владимировна, старший преподаватель кафедры программной инженерии ПГУТИ. 443090, Российская Федерация, г. Самара, Московское шоссе, 77. Тел. +7 095 017-94-90. E-mail: chernova_s_v@bk.ru

AT THE CROSSROADS OF TECHNOLOGY AND MEDICINE: PROSPECTS OF AUTOMATION IN MEDICAL PRACTICE WITH THE USE OF NEURAL NETWORKS

Belov K.S., Kharitonov A.S., Chernova S.V.

Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russian Federation

E-mail: frozent.03@mail.ru

This article delves into the exciting possibilities that arise when technology is applied to the field of medicine. It explores how automation can streamline various processes, leading to more efficient and accurate healthcare. One focus area is the potential for replacing direct interaction between doctors and patients with automated systems. By utilizing advanced neural networks, diagnostic and treatment processes can become automated, leading to faster and more precise outcomes. For example, AI-powered systems can analyze medical images and detect abnormalities with incredible accuracy, aiding doctors in making diagnoses. Additionally, virtual assistants and chatbots can provide personalized healthcare advice, reducing the need for in-person consultations for minor concerns. These advancements not only enhance efficiency but also have potential to improve access to healthcare, especially in remote areas. Embracing technology in medicine opens up a lot of possibilities for better patient care and overall healthcare outcomes.

Keywords: *medicine, technology, neural networks, system, diagnostics*

DOI: 10.18469/ikt.2023.21.4.13

Belov Kirill Sergeevich, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 77, Moskovskoe shosse, Samara, 443090, Russian Federation; Student of Computer Science and Computer Engineering Department. Tel. +7 964 980-06-79. Email: frozent.03@mail.ru

Kharitonov Alexander Sergeevich, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 77, Moskovskoe shosse, Samara, 443090, Russian Federation; Student of Computer Science and Computer Engineering Department. Tel. +7 939 711-04-49. Email: sasha2030203020302030@mail.ru

Chernova Svetlana Vladimirovna, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 77, Moskovskoe shosse, Samara, 443090, Russian Federation; Senior Teacher of Software Engineering Department. Tel. +7 095 017-94-90. Email: chernova_s_v@bk.ru

References

1. Kahn K. *Neural networks. Evolution*. Moscow: Samizdat, 2020. 76 p. (In Russ.)
2. Fersht V.M., Latkin A.P., Ivanova V.N. Modern approaches to the use of artificial intelligence in medicine. *Territoriya novykh vozmozhnostej. Vestnik Vladivostokskogo gosudarstvennogo universiteta ekonomiki i servisa*, 2020, vol.12, no.1, pp. 121–130. (In Russ.)
3. Ifeachor E.C., Sperduti A., Starita A. Neural Networks and Expert Systems in Medicine and Healthcare. *Proceedings of the Third International Conference*. World Scientific Publishing Company, 1998, 368 p.
4. Topol E. *Artificial Intelligence in medicine: How Smart technologies change the approach to treatment*. Moscow: Al'pina Publisher, 2022, 398 p. (In Russ.)
5. Kazantsev T. *ChatGPT and the Revolution of artificial Intelligence*. Moscow: Samizdat, 2023. 150 p. (In Russ.)
6. Kaplan Medical. USMLE Step 1. Lecture Notes. URL: <https://silo.pub/kaplan-usmle-step-1-lecture-notes-2009-2010-behavioral-sciences.html> (accessed: 16.05.2024).
7. Kaplan Medical. USMLE Step 2 CK Qbook. Lecture Notes. URL: <https://silo.pub/kaplan-lecture-notes-step-2-ck.html> (accessed: 16.05.2024).
8. Kaplan Medical. USMLE Master the Boards. Step 3. URL: <https://silo.pub/kaplan-medical-usmle-master-the-boards-step-3.html> (accessed: 16.05.2024).
9. Dushkin R. *Artificial intelligence*. Moscow: DMK Press, 2022. 28 c. (In Russ.)
10. Nikoleenko S.I., Kadurin A.A., Arkhangelsk E.O. *Deep Learning*. Saint-Petersburg: Piter, 2017, 480 p. (In Russ.)

Received 27.11.2023

ТЕХНОЛОГИИ РАДИОСВЯЗИ, РАДИОВЕЩАНИЯ И ТЕЛЕВИДЕНИЯ

УДК 004.051

АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ УСЛУГ ОПЕРАТОРАМИ ПОДВИЖНОЙ РАДИОТЕЛЕФОННОЙ СВЯЗИ ПРИВОЛЖСКОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО ОКРУГА

Сутягина Л.Н.

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ

E-mail: docent.sutaygin@yandex.ru

В статье приведены результаты анализа основных показателей качества предоставления услуг подвижной радиотелефонной связи. Источником получения данных для такого анализа стали результаты испытаний, которые организовал Роскомнадзор в период с 2022 по 2023 год на сетях четырех основных операторов сотовой связи (Билайн, МегаФон, МТС и Теле2) в пяти крупнейших городах Приволжского федерального округа с населением более миллиона жителей. Выполнен выбор основных показателей качества: передачи голоса, передачи данных и передачи SMS сообщений, по которым производится сравнительный анализ, основанный на рейтинговой методике. Распределены позиции объектов контроля (город-центр региона и операторы подвижной радиотелефонной связи) в соответствии с величиной односторонних показателей по каждому параметру контроля с определением лучших и худших объектов. Составлен совокупный итоговый рейтинг по каждому городу, где проводились проверки, и каждому оператору.

Ключевые слова: подвижная радиотелефонная связь, показатели качества голосового соединения, показатели качества передачи SMS сообщений, показатели качества передачи данных, рейтинговая оценка

Введение

Первоочередной задачей любого современного производства или предприятия, к которым относятся телекоммуникационные сети, является получение прибыли посредством предоставления клиентам товаров или услуг определенного качества, под

которым в общем виде понимается соответствие предлагаемых услуг и продукции определенным требованиям. Возможности телекоммуникационных сетей позволяют удовлетворять потребности людей в обмене информацией разного вида, используя для этого сети фиксированной и мобильной связи. Для получения высокой прибыли оператор

рам таких сетей необходимо предоставлять своим и потенциальным клиентам постоянно расширяющийся спектр инфокоммуникационных услуг, используя для этого внедрение новых технологий. Оценить эффективность внедрения таких услуг операторами сетей подвижной радиотелефонной связи (ПРТС) позволяют измерения, которые регулярно организует Роскомнадзор РФ.

В настоящее время используются следующие концепции, оценивающие качество услуг связи. Первая концепция QoS (Quality of Service) [1] предполагает использование характеристик, которые показывают степень удовлетворенности клиента уровнем услуги, предоставленной данным оператором. Вторая концепция QoE (Quality of Experience) [2] предусматривает использование показателей, которые оценивают качество восприятия услуги с точки зрения клиента и являются чисто субъективным измерением общей ценности предоставляемых услуг. В соответствии с этими концепциями разработана методика контроля качества услуг, предоставляемых операторами ПРТС и нормы на показатели качества услуг связи [3; 4].

Результаты выполненного сравнительного анализа основных показателей качества предоставления услуг операторами ПРТС Приволжского федерального округа (ПФО) позволили определить позиции объектов контроля в соответствии с величиной однотипных показателей качества предоставления услуг с определением лучших и худших объектов.

Нормативная база и порядок организации измерений для контроля качества услуг подвижной радиотелефонной связи

Нормативной базой развертывания и работы сетей подвижной радиотелефонной связи являются соответствующие рекомендации ИТУ-Т, ГОСТы, руководящие документы Министерства цифрового развития России [3–13] и прежде всего:

1. ГОСТ Р 53731-2009, ГОСТ Р 53732-2009 – Качество услуг связи. Термины и определения. Качество услуг сотовой связи. Показатели качества.

2. ГОСТ Р 55388-2012 – Система национальных стандартов в области качества услуг связи. Оценка качества услуг связи на основе мнений потребителей.

3. ГОСТ Р 56087.5-2014 – Система национальных стандартов в области качества услуг связи. Качество услуг сотовой подвижной связи. Нормативные значения показателей.

Следует отметить, что показатели качества предоставляемых услуг не зависят от стандарта сетей подвижной радиотелефонной связи, используемого оборудования и типа вызовов.

Контроль качества услуг, предоставляемых крупнейшими операторами РФ, осуществляет Роскомнадзор.

Особенность организации измерений параметров качества услуг ПРТС состоит в том, что неизвестно местонахождение конкретного абонента. Это обстоятельство требует использования мобильных измерительных аппаратно-программных ком-

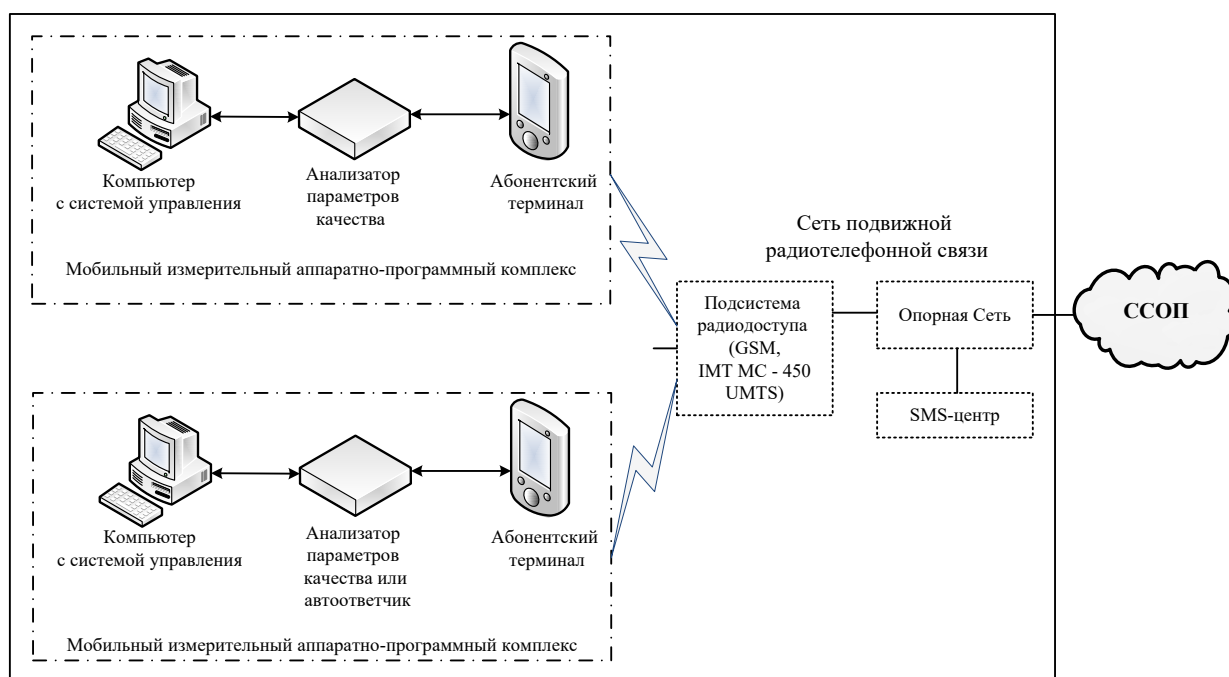


Рисунок 1. Схема проведения контроля параметров качества услуг ПРТС

Таблица 1. Протокол контроля параметров качества услуг подвижной радиотелефонной связи № 1 от «20» июня 2023 г.

Параметры качества	Требования к граничным значениям	Значение	Значение	Значение	Значение
Показатели качества услуг подвижной радиотелефонной связи в части голосового соединения		Билайн	МТС	Мегафон	Теле2
Доля неуспешных попыток установления голосового соединения (Voice Service Non-Acessibility) [%]	не более 5	0,5	0,3	0,4	0,3
Доля обрывов голосовых соединений (Voice Service Cut-off Ratio) [%]	не более 5	0,2	0,1	0,3	0,1
Средняя разборчивость речи на соединение (Speech Quality on Call basis (MOS POLQA))	не менее 2,6	4,0	4,2	4	3,9
Доля голосовых соединений с низкой разборчивостью речи (Negative MOS samples Ratio, MOS POLQA < 2,6) [%]		0,2	0,2	0,2	0,2
Показатели качества услуг подвижной радиотелефонной связи в части передачи коротких текстовых сообщений					
Доля недоставленных SMS сообщений [%]		3,1	8,3	2,4	2,5
Среднее время доставки SMS сообщений [сек]		4,0	4,7	3,4	5,3
Показатели качества услуг связи по передаче данных, за исключением услуг связи по передаче данных для целей передачи голосовой информации					
Доля неуспешных сессий по протоколу HTTP (HTTP Session Failure Ratio) [%]		31,7	11,5	9,1	6,2
Среднее значение скорости передачи данных от абонента (HTTP UL Mean User Data Rate) [kbit/sec]		1859,0	1664,4	2017,2	2026,5
Среднее значение скорости передачи данных к абоненту (HTTP DL Mean User Data Rate) [kbit/sec]	не менее 80	9879,7	8991,4	7777,5	8700,0
Продолжительность успешной сессии (HTTP Session Time) [s]		18,9	11,1	11,1	10,6
Справочная информация					
Общее количество тестовых голосовых соединений		7583	7587	7593	7621
Общее количество голосовых последовательностей в оцениваемых соединениях (POLQA)		97058	90669	97312	96818
Количество речевых последовательностей с низкой разборчивостью (Negative MOS samples Count, MOS POLQA < 2,6)		207	196	224	160
Общее количество отправленных SMS-сообщений		1031	1010	1088	1081
Общее количество попыток соединений с сервером передачи данных HTTP (Загрузка файлов)		2839	3594	3120	3153
Общее количество тестовых сессий по протоколу HTTP (Web-browsing)		4536	4031	4159	4191

плексов, которые имитируют местонахождение абонента, пользующегося услугой подвижной связи в различных точках зоны обслуживания. Схема проведения контроля параметров качества услуг ПРТС, приведена на рисунке 1 [4].

Организация измерений и расчет показателей качества должен выполняться в соответствии с требованиями технических спецификаций [7–13]. Методика, которая используется для проведения измерений и оценки показателей качества услуг ПРТС в Российской Федерации, изложена в [3; 4; 14; 15] и предусматривает контроль следующих показателей:

- 1) оценка качества голосового соединения;
- 2) оценка качества передачи SMS сообщений;
- 3) оценка качества передачи данных.

Результаты обработки проведенных измерений используются для определения параметров качества услуг подвижной радиотелефонной связи в соответствии с методикой, изложенной в [3], и заносятся в протоколы оценочных измерений показателей качества [3, с. 31], форма которых приведена в виде таблицы 1.

В таблице 1 представлен протокол контроля параметров качества услуг подвижной радиотелефонной связи № 1 от «20» июня 2023 г.

Объект контроля: ПАО «ВымпелКом», ПАО «МегаФон», ПАО «МТС», ООО «Т2 Мобайл».

Время проведения контроля: с 05.04.2023 г. по 14.06.2023 г.

Место проведения контроля: г. Казань.

Условия проведения контроля: без подключения к радиоэлектронным системам радиоизмерительным комплексом TEMS Automatic, нормальные условия.

Измерительное оборудование: Радиоизмерительный комплекс TEMS Automatic.

Протоколы контроля параметров качества услуг подвижной радиотелефонной связи, размещаются на сайте Роскомнадзора [16].

Приведенные в протоколах данные были обработаны и использовались для анализа качественных характеристик работы операторов ПРТС в 2022 году и первой половине 2023 года на сетях четырех крупнейших операторов сотовой подвижной связи (Билайн, МегаФон, МТС и Теле2) в пяти городах ПФО с населением более миллиона жителей.

Оценка результатов проверок

Основные контролируемые показатели качества, перечисленные в таблице 1, нормируются. Нормы на показатели качества основных услуг [14; 15] показаны в таблице 2.

Результаты обработки протоколов измерений контроля качества услуг, предоставляемых крупнейшими операторами ПРТС в ПФО, полученные Роскомнадзором представлены в таблицах 3–10 [16–18].

Коэффициент R в перечисленных таблицах является рейтинговой оценкой контролируемых показателей, методика определения которой описана ниже.

Анализируя данные, приведенные в таблицах 3–10, можно сделать следующие выводы:

1) по показателям качества, приведенным в таблицах 3–6, все операторы обеспечивают работу в пределах нормативных значений;

2) в таблице 7 у всех операторов показатели выше нормы. Возможными причинами этого могут быть задержки сверх времени таймаута. К числу не доставленных SMS сообщений относятся и те из них, в которых произошло искажение хотя бы одного бита в тексте SMS сообщений. Единственный результат, отвечающий рекомендуемому требованием, зарегистрирован в Н. Новгороде у оператора МТС;

3) в таблице 8 только два показателя соответствуют нормативному значению среднего времени доставки SMS сообщений;

Таблица 2. Показатели качества основных услуг ПРТС

№ п/п	Наименование показателя	Требования к граничным значениям
1	Доля неуспешных попыток установления голосового соединения, %	≤ 5
2	Доля обрывов голосовых соединений, %	≤ 5
3	Средняя разборчивость речи – MOS	$> 2,6$
4	Доля голосовых соединений с низкой разборчивостью речи, %	< 5
5	Доля не доставленных SMS сообщений, %	$< 0,9$
6	Среднее время доставки SMS сообщений, с	< 8
7	Доля неуспешных сессий по протоколу HTTP, %	$< 2,1$
8	Среднее значение скорости передачи данных к абоненту, кбит/сек	> 80
9	Продолжительность успешной сессии, с	–

Таблица 3. Доля неуспешных попыток установления голосового соединения

Объект контроля	Билайн		МТС		МегаФон		Теле2	
	Значение показателя, %	R	Значение показателя, %	R	Значение показателя, %	R	Значение показателя, %	R
Казань	0,5	5-6	0,4	3-4	0,3	1-2	0,3	1-2
Н. Новгород	0,6	7	1,1	9-11	3,4	18	1,6	16
Пермь	1,4	14-15	1,8	17	1,1	9-11	1,3	13
Самара	4,4	19	0,8	8	1,4	14-15	0,4	3-4
Уфа	0,5	5-6	1,1	9-11	1,2	12	–	–

Таблица 4. Доля обрывов голосовых соединений

Объект контроля	Билайн		МТС		МегаФон		Теле2	
	Значение показателя, %	R	Значение показателя, %	R	Значение показателя, %	R	Значение показателя, %	R
Казань	0,2	3-6	0,3	7	0,1	1-2	0,1	1-2
Н. Новгород	0,9	15	0,7	12	2,6	19	0,2	3-6
Пермь	1,7	18	1,4	16	0,5	10-11	0,8	13-14
Самара	0,4	8-9	0,2	3-6	0,4	8-9	0,2	3-6
Уфа	1,5	17	0,8	13-14	0,5	10-11	–	–

Таблица 5. Средняя разборчивость речи

Объект контроля	Билайн		МТС		МегаФон		Теле2	
	Значение показателя MOS	R	Значение показателя MOS	R	Значение показателя MOS	R	Значение показателя MOS	R
Казань	4,0	8-13	4,0	8-13	4,2	1-4	3,9	14-17
Н. Новгород	4,0	8-13	4,2	1-4	3,8	19	3,9	14-17
Пермь	3,9	14-17	4,0	8-13	4,0	16	4,1	4-7
Самара	3,8	18-19	4,1	5-7	4,1	7-8	3,9	14-17
Уфа	4,1	5-7	4,2	1-4	4,2	11	–	–

Таблица 6. Доля голосовых соединений с низкой разборчивостью речи

Объект контроля	Билайн		МТС		МегаФон		Теле2	
	Значение показателя MOS, %	R	Значение показателя MOS, %	R	Значение показателя MOS, %	R	Значение показателя MOS, %	R
Казань	0,2	1-6	0,2	1-6	0,2	1-6	0,2	1-6
Н. Новгород	1,2	14-15	0,3	7-8	1,9	19	0,4	9
Пермь	1,7	17-18	0,9	12	1,3	16	1,7	17-18
Самара	1,0	13	0,2	1-6	0,3	7-8	0,2	1-6
Уфа	1,2	14-15	0,5	10	0,7	11	–	–

Таблица 7. Доля не доставленных SMS сообщений

Объект контроля	Билайн		МТС		МегаФон		Теле2	
	Значение показателя, %	R	Значение показателя, %	R	Значение показателя, %	R	Значение показателя, %	R
Казань	3,1	8	2,4	5	8,3	15-16	2,5	6
Н. Новгород	4,5	10	0,7	1	15,1	19	10,0	17
Пермь	7,3	12-13	3,0	7	5,1	11	6,6	14
Самара	8,3	15-16	1,9	3	12,8	18	2,1	4
Уфа	1,2	2	3,3	9	7,3	12-13	–	–

Таблица 8. Среднее время доставки SMS сообщений

Объект контроля	Билайн		МТС		МегаФон		Теле2	
	Значение показателя, сек.	R	Значение показателя, сек.	R	Значение показателя, сек.	R	Значение показателя, сек.	R
Казань	4,0	7	3,4	4	4,7	8	5,3	10-11
Н. Новгород	5,7	12	0,7	1	15,1	19	10,0	18
Пермь	6,5	14	7,0	15	6,3	13	7,3	16-17
Самара	5,2	9	3,5	5	3,7	6	5,3	10-11
Уфа	1,2	2	3,3	3	7,3	16-17	–	–

Таблица 9. Доля неуспешных сессий по протоколу HTTP

Объект контроля	Билайн		МТС		МегаФон		Теле2	
	Значение показателя, %	R	Значение показателя, %	R	Значение показателя, %	R	Значение показателя, %	R
Казань	31,7	19	9,5	13-14	11,5	17	6,2	9
Н. Новгород	2,6	3	2,0	1	2,5	2	6,3	10
Пермь	3,0	4	9,5	13-14	4,0	5	8,1	11
Самара	10,0	16	9,6	15	9,2	12	4,9	6
Уфа	28,1	18	5,1	7	5,8	8	–	–

Таблица 10. Продолжительность успешной сессии

Объект контроля	Билайн		МТС		МегаФон		Теле2	
	Значение показателя, сек.	R	Значение показателя, сек.	R	Значение показателя, сек.	R	Значение показателя, сек.	R
Казань	18,9	18	11,1	4-6	11,1	4-6	10,6	2
Н. Новгород	11,4	8	11,1	4-6	12,6	10	10,4	1
Пермь	15,8	17	14,1	13	15,2	16	14,8	14
Самара	12,7	11	11,2	7	12,0	9	10,8	3
Уфа	19,2	19	13,4	12	15,0	15	–	–

4) в таблице 9 только один показатель соответствует нормативному значению;

5) у всех операторов зафиксировано значительное превышение нормативного значения средней скорости передачи данных к абоненту. При наличии таких данных теряется смысл присвоения рейтинга по данному показателю;

6) данные, приведенные в таблице 10, показали, что у всех контролируемых операторов этот показатель отличается незначительно.

Методика определения рейтинга по операторам и регионам

Целью обработки и последующего анализа результатов контролируемых показателей качества услуг, предоставляемых крупнейшими операторами ПРТС в ПФО является:

– выявление лучших и, соответственно, худших операторов ПРТС по каждому контролируемому

показателю в каждом объекте, а также в целом по ПФО;

– определение лучших и, соответственно, худших операторов по совокупности однотипных показателей (голосовые соединения, SMS, услуги связи по передаче данных);

– определение лучших и, соответственно, худших операторов по совокупности всех контролируемых показателей;

– определение города, в котором получены наилучшие показатели качества предоставления услуг всех контролируемых операторов ПРТС.

Для проведения данного анализа из множества методов обработки статистических данных, полученных в результате измерений, был выбран робастный метод [19], позволяющий не учитывать размерность и абсолютное значение контролируемых показателей.

Анализируемые результаты контролируемых показателей качества услуг, предоставляемых опе-

раторах ПРТС, имеют разные размерности, законы распределения случайных величин и разные нормативные требования. Учитывая это, в соответствии с [19] используются рейтинговые оценки контролируемых показателей. Рейтинговые оценки основаны на построении ряда значений показателей по принципу их возрастания или убывания. В том случае, если необходимо стремление к минимальному значению первым в ряду будет самая малая величина, остальные будут располагаться следом, по мере возрастания значений.

Математически это описывается следующим образом: $r_1 > r_2 > r_3 > \dots > r_n$. Соответственно в том случае, когда приоритетнее максимальное значение следом за самой большой величиной располагаются остальные по мере убывания значений. Численное значение ранга в баллах соответствует позиции в ряду: $r_1 > r_2 > r_3 > \dots > r_n$.

Ранжирование носит не строгий характер, поэтому в случае равенства численных значений показателей допускается деление позиций. В этом случае для всех показателей будет использован одинаковый рейтинг, например, если $r_1 = r_2 = r_3$, тогда $(r_1 + r_2 + r_3) / 3$.

Наилучшими будут считаться операторы и горо-

да с наименьшей суммой баллов, которая определена для каждого вида услуг с последующим суммированием по всем услугам:

$$R_i = \sum_{j=1}^n r_j, \quad (1)$$

где r_j – ранг по j -му виду услуг;

R_i – совокупный ранг региональной столицы.

В соответствии с приведенной методикой обработаны данные таблиц 2-9. Итоговая рейтинговая оценка качества услуг по операторам и городам ПФО произведена в таблице 11.

Заключение

В результате обработки данных контроля качественных характеристик работы операторов ПРТС ПФО, представленных в протоколах измерений, проведенных Роскомнадзором, в 2022 году и первой половине 2023 года на сетях четырех крупнейших операторов сетей сотовой подвижной связи (Билайн, МегаФон, МТС и Теле2) в пяти городах ПФО с населением более миллиона жителей можно отметить:

1. Лучшие показатели качества голосового соединения имеют операторы ПРТС, работающие в г. Казань, а самые плохие – у операторов в г. Пермь.

Таблица 11. Итоговая рейтинговая оценка качества услуг по операторам и городам ПФО

Город	Контролируемые показатели	Оператор ПРТС				Сумма баллов по всем показателям для города
		Билайн	МТС	Мегафон	Теле2	
Казань	Показатели качества услуг голосового соединения	24	24,5	9	22	79,5
	Показатели качества обслуживания SMS сообщений	15	9	6	16,5	46,5
	Показатели качества обслуживания услуг передачи данных	37	18,5	22	12,5	90
	Сумма баллов контролируемого оператора города	76	52	37	51	216
Нижний Новгород	Показатели качества услуг голосового соединения	47	32	75	55	209
	Показатели качества обслуживания SMS сообщений	16,5	2	38	35	91,5
	Показатели качества обслуживания услуг передачи данных	11	6	12	11	40
	Сумма баллов контролируемого оператора города	74,5	40	125	101	340,5

Город	Контролируемые показатели	Оператор ПРТС				Сумма баллов по всем показателям для города
		Билайн	МТС	Мегафон	Теле2	
Пермь	Показатели качества услуг голосового соединения	65,5	66	52,5	49,5	233,5
	Показатели качества обслуживания SMS сообщений	16,5	22	16	30,5	84,5
	Показатели качества обслуживания услуг передачи данных	21	26,5	21	25	93,5
	Сумма баллов контролируемого оператора города	103	114,5	89,5	105	411,5
Самара	Показатели качества услуг голосового соединения	59	22	38	37	149
	Показатели качества обслуживания SMS сообщений	31,5	8	24	10	73,5
	Показатели качества обслуживания услуг передачи данных	11	7	9	14	41
	Сумма баллов контролируемого оператора города	101,5	37	71	26	263,5
Уфа	Показатели качества услуг голосового соединения	238,5	191,5	219	–	134,5
	Показатели качества обслуживания SMS сообщений	4	12	29	–	45
	Показатели качества обслуживания услуг передачи данных	37	19	23	–	79
	Сумма баллов контролируемого оператора города	279,5	222,5	271	–	258,5
Сумма баллов контролируемых операторов во всех городах		634,5	466	593,5	283	

Данный показатель является лучшим у оператора «МегаФон» г. Казань.

2. Лучший показатель качества передачи SMS сообщений получен в г. Уфа. Худшей по данному показателю стала Пермь.

3. Лучший оператор по показателю качества передачи SMS сообщений у ПАО «МТС» в Нижнем Новгороде. Худшие показатели у ПАО «МегаФон» в том же Нижнем Новгороде.

4. Рейтинговая оценка показателя скорости передачи данных к абоненту не оценивалась, так как данные протоколов показали у всех контролируемых операторов сетей сотовой подвижной связи

значительное превышение нормативного значения.

5. Лучшие показатели качества передачи данных у операторов ПРТС Нижнего Новгорода, худшие – в Перми.

6. В соответствии с полученными рейтинговыми оценками наилучшие контролируемые показатели качества основных услуг ПРТС в г. Казани, на втором месте – г. Уфа, далее г. Самара, г. Нижний Новгород и на последнем месте в этом рейтинге – г. Пермь. Следует отметить, что в г. Уфа и г. Казань оператор ООО «Теле2» не работает.

7. Лучшие рейтинговые оценки по контролируемым показателям имеет ПАО «МТС», далее идут

ПАО «МегаФон» и ПАО «ВымпелКом» (Билайн). При определении данного рейтинга оператор Теле2 не учитывался поскольку он работает не во всех городах, где проводились наблюдения.

Осуществляя госконтроль выполнения операторами ПРТС требований к качеству предоставляемых услуг, Роскомнадзор формирует доказательную базу, которая может быть использована для разрешения споров пользователей с операторами. Данные, публикуемые на Сайте Роскомнадзора [16], используются операторами сотовой сети подвижной связи для объективной оценки качества предоставляемых ими услуг. Эта информация также будет интересна пользователям при выборе оператора в своем регионе.

Литература

1. ITU-T Rec. E.804 (02/2014). Series E: overall network operation, telephone service, service operation and human factors. Geneva, 2014. 435 p.
2. ETSI TR 102 643 V1.0.1. Human Factors (HF); Quality of Experience (QoE) requirements for real-time communication services. URL: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/31984/2d019e259f8241d787b06172662e488e/ETSI-TR-102-643-V1-0-1-2009-12-.pdf> (дата обращения: 16.10.2023).
3. Методика оценки качества услуг подвижной радиотелефонной связи. URL: <https://digital.gov.ru/uploaded/files/08062017nn-p19-12345metodika-otsenki-kachestva-uslug-podvizhnoj-radiotелефонnoj-svyazi.pdf> (дата обращения: 15.10.2023).
4. Программа и методики проведения контроля параметров качества услуг подвижной радиотелефонной связи, включая MVNO. Москва, 2014. 20 с.
5. ITU-T Recommendation G.1000: Communications quality of service: A framework and definitions. Geneva, 2002. 16 p.
6. ITU-T. Network aspects of quality of service and Network Performance in digital networks, including ISDNs. Geneva, 1993. 17 p.
7. ETSI TS 102 250-1. Speech and multimedia transmission quality (STQ); QoS aspects for popular services in mobile networks; Part 1: Assessment of quality of service. URL: <https://standards.globalspec.com/std/14245111/TS%20102%20250-1> (дата обращения: 15.10.2023).
8. ETSI TS 102 250-2 V1.3.1. Speech and multimedia Transmission Quality (STQ); QoS aspects for popular services in mobile networks; Part 2: Definition of Quality of Service parameters and their computation. URL: <https://vdocuments.site/ts-102-250-2-v131-speech-processing-transmission-and-.html?page=23> (дата обращения: 15.10.2023).
9. ETSI TS 102 250-5 V2.4.1. Speech and multimedia Transmission Quality (STQ); QoS aspects for popular services in mobile networks; Part 5: Definition of Quality of typical measurement profiles. URL: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/38390/5710592e6825498f9c6413b057a4dbce/ETSI-TS-102-250-5-V2-4-1-2013-06-.pdf> (дата обращения: 16.10.2023).
10. ETSI TS 102 250-6 V1.3.1. Speech and multimedia Transmission Quality (STQ); QoS aspects for popular services in mobile networks; Part 6: Post processing and statistical methods. URL: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/58382/555ffe126fa64ae5b2e9b2c832140585/ETSI-TS-102-250-6-V1-3-1-2019-11-.pdf> (дата обращения: 16.10.2023).
11. ETSI TS 125 215 V7.2.0. Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); Physical layer; Measurements (FDD) (3GPP TS 25.215 version 7.2.0 Release 7). URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/125200_125299/125215/07.02.00_60/ts_125215v070200p.pdf (дата обращения: 16.10.2023).
12. ETSI TR 102 678 V1.2.1. Speech and multimedia transmission quality (STQ); QoS Parameter Measurements based on fixed Data Transfer Times. URL: https://luca.ntop.org/gr2020/slides/ETSI_TR_102_678.pdf (дата обращения: 16.10.2023).
13. ITU-T Recommendation E.803: Quality of service parameters for supporting service aspects. Geneva, 2022. 60 p.
14. Об утверждении Требований к оказанию услуг подвижной радиосвязи и радиотелефонной связи при использовании бизнес-моделей виртуальных сетей подвижной радиосвязи и радиотелефонной связи: Приказ Минкомсвязи России от 20.10.2017 № 570. URL: <https://digital.gov.ru/ru/documents/6086/> (дата обращения: 25.10.2023).
15. Сети сотовой подвижной связи. Нормы на показатели качества услуг связи и методики проведения их оценочных испытаний. РД 45.254-2002. URL: <http://www.rfcmd.ru/sphider/docs/sert/Normy%20na%20pokazateli%20uslug%20svyazi.htm> (дата обращения: 18.10.2023).
16. Актуальные показатели оценки качества услуг ПРТС. URL: <http://качествосвязи.рф/> (дата обращения: 12.10.2023).
17. Качество связи в городе Самаре. URL: <http://качествосвязи.рф/pfo/samara.html> (дата обращения: 21.10.2023).

18. Сетевые операторы России. URL: <http://indexmain.ru/mobile/ru> (дата обращения: 21.10.2023). чesкой статистики. Томск: Изд-во НТЛ, 2016. 260 с.
19. Шуленин В.П. Робастные методы математи-

Получено 22.11.2023

Сутягина Любовь Николаевна, доцент кафедры сетей и систем связи Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики. 443010, ул. Л. Толстого, 23. Тел. +7 927 650-27-98. E-mail: docent.sutaygin@yandex.ru

ANALYSIS OF THE GENERAL QUALITY INDICATORS OF THE PROVISION MOBILE RADIOTELEPHONE COMMUNICATION OPERATORS OF THE VOLGA FEDERAL DISTRICT

Sutagina L.N.

*Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russian Federation
E-mail: docent.sutaygin@yandex.ru*

The article presents the results of the analysis of the general quality indicators of the mobile radiotelephone services. The source of data for such analysis was the results of tests organized by Roskomnadzor in the period from 2022 to 2023 on the networks of four major mobile operators (Beeline, Megafon, MTS and Tele2) in the five largest cities of the Volga Federal District with a population of more than a million inhabitants. The main quality indicators have been selected: voice transmission, data transmission and SMS transmission, for which a comparative analysis is performed based on a rating methodology. The positions of the control objects (the city center of the region and the operators of the PRS) are distributed in accordance with the value of the same type of indicators for each control parameter with the determination of the best and worst objects. A cumulative final rating has been compiled for each city where inspections were carried out and for each operator.

Keywords: *mobile radiotelephone communication, indicators for evaluating the quality of voice connection, SMS transmission, data transmission, rating assessment*

DOI: 10.18469/ikt.2023.21.4.14

Sutyagina Lyubov Nikolaevna, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 23, L. Tolstoy Street, Samara, 443010, Russian Federation; Associate Professor of Networks and Communication Systems Department. Tel. +7 927 650-27-98. E-mail: docent.sutaygin@yandex.ru

References

1. ITU-T Rec. E.804 (02/2014). Series E: overall network operation, telephone service, service operation and human factors. Geneva, 2014. 435 p.
2. ETSI TR 102 643 V1.0.1. Human Factors (HF); Quality of Experience (QoE) requirements for real-time communication services. URL: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/31984/2d019e259f8241d787b06172662e488e/ETSI-TR-102-643-V1-0-1-2009-12-.pdf> (accessed: 16.10.2023).
3. Methodology for assessing the quality of mobile radiotelephone services. URL: <https://digital.gov.ru/uploaded/files/08062017nn-p19-12345metodika-otsenki-kachestva-uslug-podvizhnoy-radiotelefonnoy-svyazi.pdf> (accessed: 15.10.2023). (In Russ.)
4. Program and methods for monitoring quality parameters of mobile radiotelephone services, including MVNO. Moscow, 2014, 20 p. (In Russ.)
5. ITU-T Recommendation G.1000: Communications quality of service: A framework and definitions. Geneva, 2002, 16 p.
6. ITU-T. Network aspects of quality of service and Network Performance in digital networks, including ISDNs. Geneva, 1993, 17 p.
7. ETSI TS 102 250-1. Speech and multimedia transmission quality (STQ); QoS aspects for popular services in mobile networks; Part 1: Assessment of quality of service. URL: <https://standards.globalspec.com/std/14245111/TS%20102%20250-1> (accessed: 15.10.2023).

8. ETSI TS 102 250-2 V1.3.1. Speech and multimedia Transmission Quality (STQ); QoS aspects for popular services in mobile networks; Part 2: Definition of Quality of Service parameters and their computation. URL: <https://vdocuments.site/ts-102-250-2-v131-speech-processing-transmission-and-.html?page=23> (accessed: 15.10.2023).
9. ETSI TS 102 250-5 V2.4.1. Speech and multimedia Transmission Quality (STQ); QoS aspects for popular services in mobile networks; Part 5: Definition of Quality of typical measurement profiles. URL: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/38390/5710592e6825498f9c6413b057a4dbce/ETSI-TS-102-250-5-V2-4-1-2013-06-.pdf> (accessed: 15.10.2023).
10. ETSI TS 102 250-6 V1.3.1. Speech and multimedia Transmission Quality (STQ); QoS aspects for popular services in mobile networks; Part 6: Post processing and statistical methods. URL: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/58382/555ffe126fa64ae5b2e9b2c832140585/ETSI-TS-102-250-6-V1-3-1-2019-11-.pdf> (accessed: 15.10.2023).
11. ETSI TS 125 215 V7.2.0. Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); Physical layer; Measurements (FDD) (3GPP TS 25.215 version 7.2.0 Release 7). URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/125200_125299/125215/07.02.00_60/ts_125215v070200p.pdf (accessed: 16.10.2023).
12. ETSI TR 102 678 V1.2.1. Speech and multimedia transmission quality (STQ); QoS Parameter Measurements based on fixed Data Transfer Times. URL: https://luca.ntop.org/gr2020/slides/ETSI_TR_102_678.pdf (accessed: 16.10.2023).
13. ITU-T Recommendation E.803: Quality of service parameters for supporting service aspects. Geneva, 2022, 60 p.
14. On approval of the Requirements for the provision of mobile radio communications and radiotelephone services when using business models of virtual networks of mobile radio communications and radiotelephone communications: Order of the Ministry of Telecom and Mass Communications of Russia of October 20, 2017, no. 570. URL: <https://digital.gov.ru/ru/documents/6086/> (accessed: 25.10.2023). (In Russ.)
15. Cellular mobile communication networks. Standards for quality indicators of communication services and methods of conducting their evaluation tests. RD 45.254-2002. URL: <http://www.rfcmd.ru/sphider/docs/sert/Normy%20na%20pokazateli%20uslug%20svyazi.htm> (accessed: 18.10.2023). (In Russ.)
16. Current indicators for assessing the quality of PRTS services. URL: <http://качествосвязи.рф/> (accessed: 12.10.2023). (In Russ.)
17. Quality of communication in the city of Samara. URL: <http://качествосвязи.рф/pfo/samara.html> (accessed: 21.10.2023). (In Russ.)
18. Network operators in Russia. URL: <http://indexmain.ru/mobile/ru> (accessed: 21.10.2023). (In Russ.)
19. Shulenin V.P. Robust methods of mathematical statistics. Tomsk: Izd-vo NTL, 2016. 260 p. (In Russ.)

Received 22.11.2023

УПРАВЛЕНИЕ И ПОДГОТОВКА КАДРОВ ДЛЯ ОТРАСЛИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

УДК 658.5.012.14

МОДЕЛИРОВАНИЕ БИЗНЕС-ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ОПЛАТЫ ТРУДА РАБОЧИХ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ

Симагина С.Г., Матвеева Е.А., Черных О.Н., Афанасьев А.В.

*Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ
E-mail: s.simagina@psuti.ru, e.matveeva@psuti.ru, o.chernyh@psuti.ru, afanasyevav@mail.ru*

Статья посвящена вопросам, связанным с моделированием бизнес-процесса формирования оплаты труда рабочих производственного предприятия в условиях цифровой трансформации. Показана важность моделирования бизнес-процесса оплаты труда рабочих, от которого во многом зависит эффективность деятельности производственного процесса, и соответственно, эффективность деятельности предприятия в целом. Разработана модель формирования оплаты труда рабочих, включающая информационный, технологический и организационный аспекты. Объективное оценивание труда рабочих приводит к повышению мотивации, к высокопроизводительному и качественному труду. Показано применение системы сбалансированных показателей, позволяющей перейти от стратегии к оперативному планированию с учетом взаимного влияния четырех модулей – финансового, производственного, потребительского и инновационного. В совокупности эти модули оказывают значительное влияние на повышение эффективности деятельности всего предприятия. Однако, без цифровой трансформации невозможно рассматривать инновационную деятельность предприятия. Кроме того, только в условиях цифровой информации возможно отказаться от малоаргументированного распределения сменно-суточных заданий рабочим и оперативно мониторить их выполнение. Разработка методики оплаты труда рабочих приводит к тому, что имея оперативные результаты производственной деятельности реализуется возможность непредвзято оценивать труд рабочих, проводить мониторинг их деятельности и определять размер поощрения не только раз в месяц, но и ежедневно. Реализация данной методики позволяет активировать рабочих на выполнение сменно-суточных заданий в определенные планом сроки и в установленном диапазоне, повысить производственную дисциплину, побуждать к экономному расходованию материальных, энергетических и других ресурсов. Кроме того, производственная информация оперативно отображается в системе управления, что дает возможность руководителям иметь актуальную картину выполнения производственного плана.

Ключевые слова: *цифровая трансформация, моделирование, методика оплаты труда рабочих, ежедневное формирование и учет сменно-суточных заданий, стимулирование, мотивация*

Введение

Любое предприятие стремится к повышению эффективности своей деятельности. На повышение эффективности значительное влияние оказывает функция планирования производства. Планирование производства включает стратегическую и оперативную составляющие. Кроме планирования необходимо включать в управление такие функции, как сбор, обработка и анализ информации, контроль производственных процессов, мотивация [1–4]. Для анализа составляющих, влияющих на функцию мотивации целесообразно разработать модель, учитывающую различные аспекты деятельности – информационный, технологический, организационный. Эти составляющие позволяют в совокупности рассматривать такие аспекты, как развитие производства, сбор и анализ данных, человеческий фактор. Используя полученные данные появляется возможность разработать алгоритмы и методику расчета премии, как каждому рабочему за выполненный объем работ, так и всему производственному участку. Мотивация является весьма важной и сложной функцией управления, непосредственно влияющей на качественное и своевременное выполнение производственных заданий. В условиях цифровой трансформации предприятий появляется возможность включить функцию мотивации в информационную систему управления, что позволит избежать субъективизма при оценивании вклада каждого рабочего в выполнение плановых заданий, и тем самым окажет стимулирующее воздействие на качественный и эффективный труд [7–9].

При разработке модели деятельность предприя-

тия необходимо учитывать согласование стратегических и оперативных планов деятельности. Связь стратегии с оперативными действиями требуется для выработки мероприятий, позволяющих достигнуть целей предприятия. Прогрессивным подходом, объединяющим стратегию и оперативное планирование, является сбалансированная система показателей (ССП), разработанная Д. Нортон и Р. Капланом [6], основанная на рассмотрении четырех базовых позиций – финансовой, производственной, потребительской и инновационной (рисунк 1) [6; 10].

Эти четыре позиции оказывают наибольшее влияние на разработку стратегии предприятия. В совокупности рассматривается влияние на эффективность деятельности таких показателей как положение предприятия в сравнении с конкурентами, внедрение передовых технологий, в том числе цифровая трансформация, мотивация сотрудников. Для реализации функции мотивации необходимо сформировать систему оплаты труда, включающую премирование за своевременное и качественное выполнение сменно-суточных заданий. Необходимо, чтобы каждый рабочий понимал за что начисляется премия, а за что ее могут лишить.

Система сбалансированных показателей является методологией системного планирования и управления. Использование СПП позволяет осуществить переход от стратегии к оперативному планированию. В модуле обучения и развития показывается каким образом возможно обмениваться информацией в рамках производственных участков и всего предприятия в целом с учетом обратной связи внутри и между подразделениями. Своевременный

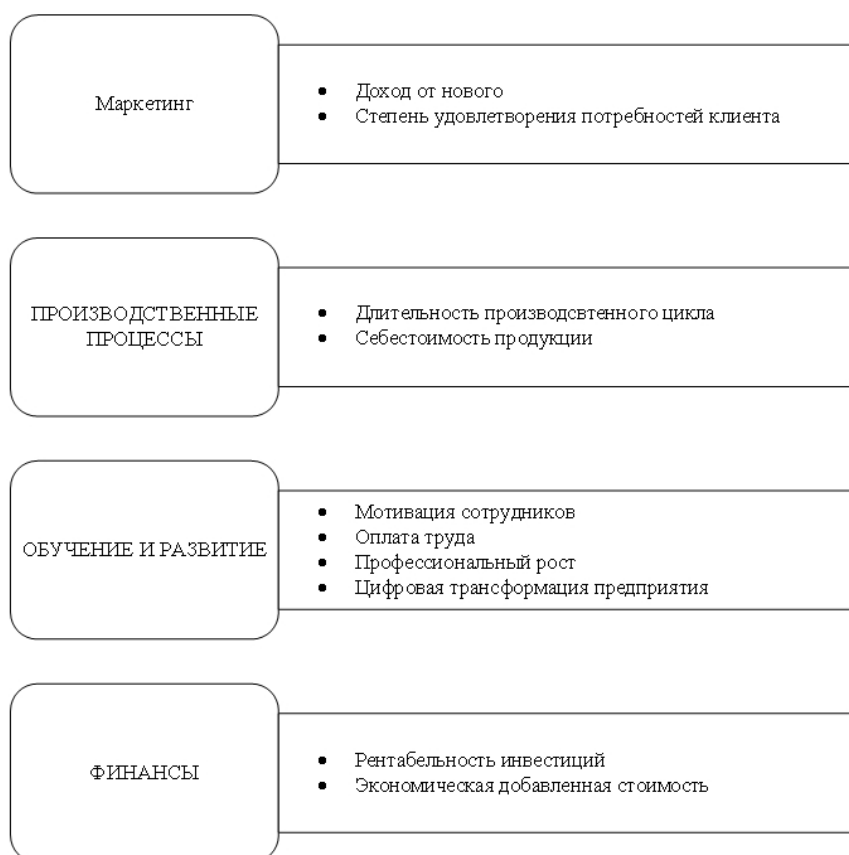


Рисунок 1. Модули сбалансированной системы показателей

обмен информацией позволяет видеть, как выполняются сменно-суточные задания, соблюдается ли график или имеются задержки. Для соблюдения графика работ необходимо мотивировать рабочих к производительному и качественному труду и обучению. Серьезным стимулом является справедливая оплата труда. Поэтому вопросы, связанные с разработкой модели формирования оплаты труда, требуют разработки специальных критериев и методики [6; 10].

ССП позволяет рассматривать в комплексе всю систему организации и управления предприятием.

В рамках оперативного планирования рассматриваются не только вопросы формирования и выдача сменно-суточных заданий для каждого рабочего, но формирование ответственности за их выполнение. Задания должны быть выполнены в запланированном объеме и в предусмотренные планом сроки. Эти критерии влияют на начисление заработной платы и премии [1; 4; 7; 9].

Кроме того, в условиях цифровой трансформации появляется возможность оперативного отображения в системе управления информации по выполненным сменно-суточным заданиям, что приводит к пониманию что и в каком объеме произведено за каждую смену.

Постановка задачи

Для стимулирования рабочих к производительному и качественному выполнению сменно-суточных заданий и внесения информации в систему управления в сроки, определенные приказом по предприятию, разработана модель формирования заработной платы. Согласно разработанной модели заработная плата начисляется в зависимости от результатов трудовой деятельности. Увеличение заработной платы возможно в том случае, если рабочий повышает квалификацию, осваивает смежные профессии, сокращает время выполнения производственных заданий без потери качества. Эти критерии влияют не только на индивидуальные показатели труда, но и на показатели всего производственного участка.

Стимулирование рабочих побуждает их к интенсификации труда, соблюдению трудовой дисциплины, что приводит к повышению производительности труда как каждого рабочего, так и работы производственного участка, и возрастанию результативности рационального использования всех видов ресурсов предприятия.

Изучая основные положения концепции СПС можно заметить, что система оплаты труда, является одной из составляющих модуля обучения и раз-

вития. Кроме того, необходимо иметь в виду, что справедливая оплата труда приводит к улучшению результатов деятельности всего предприятия. Для формирования справедливой системы оплаты труда требуется разработка методики, позволяющей оперативно и непредвзято начислять заработанную плату и премию за выполнение индивидуально-сменно-суточного задания каждым рабочим и участком в целом.

Для повышения эффективности деятельности предприятия необходимо создать систему оплаты труда рабочих, которая побуждает их к выполнению сменно-суточных заданий в запланированные сроки и с высоким качеством. Исполнение заданий в определенные плановые сроки, способствует достижению плановых значений всего участка, и в итоге всего предприятия, с незначительными несоответствиями в сравнении с календарным планом производства [4–5].

В настоящее время вопросам мотивации уделяется недостаточно внимания. Мастера производственных участков субъективно и малоаргументированно формируют сменно-суточные задания рабочим и ведут учет их выполнения. Система, основанная на субъективизме, не позволяет мотивировать рабочих к повышению производительности труда. Необходимо разработать систему оплаты труда, позволяющую результативно и справедливо определять вклад каждого рабочего в выполнение плановых сменно-суточных заданий. Цифровая трансформация предприятий, предусматривающая их автоматизацию, позволяет включить в системы управления объективное распределение производственных заданий и автоматический учет их выполнения. В вопросах начисления премии за выполненные задания появляется возможность перехода от начисления премии один раз в месяц к ежедневному начислению на основании данных по выполненным работам, с учетом установленных процентных ставок по подразделению. Данные берутся из заказ-нарядов, закрытых в текущем месяце.

Использование современных информационных технологий, реализованных в системах управле-

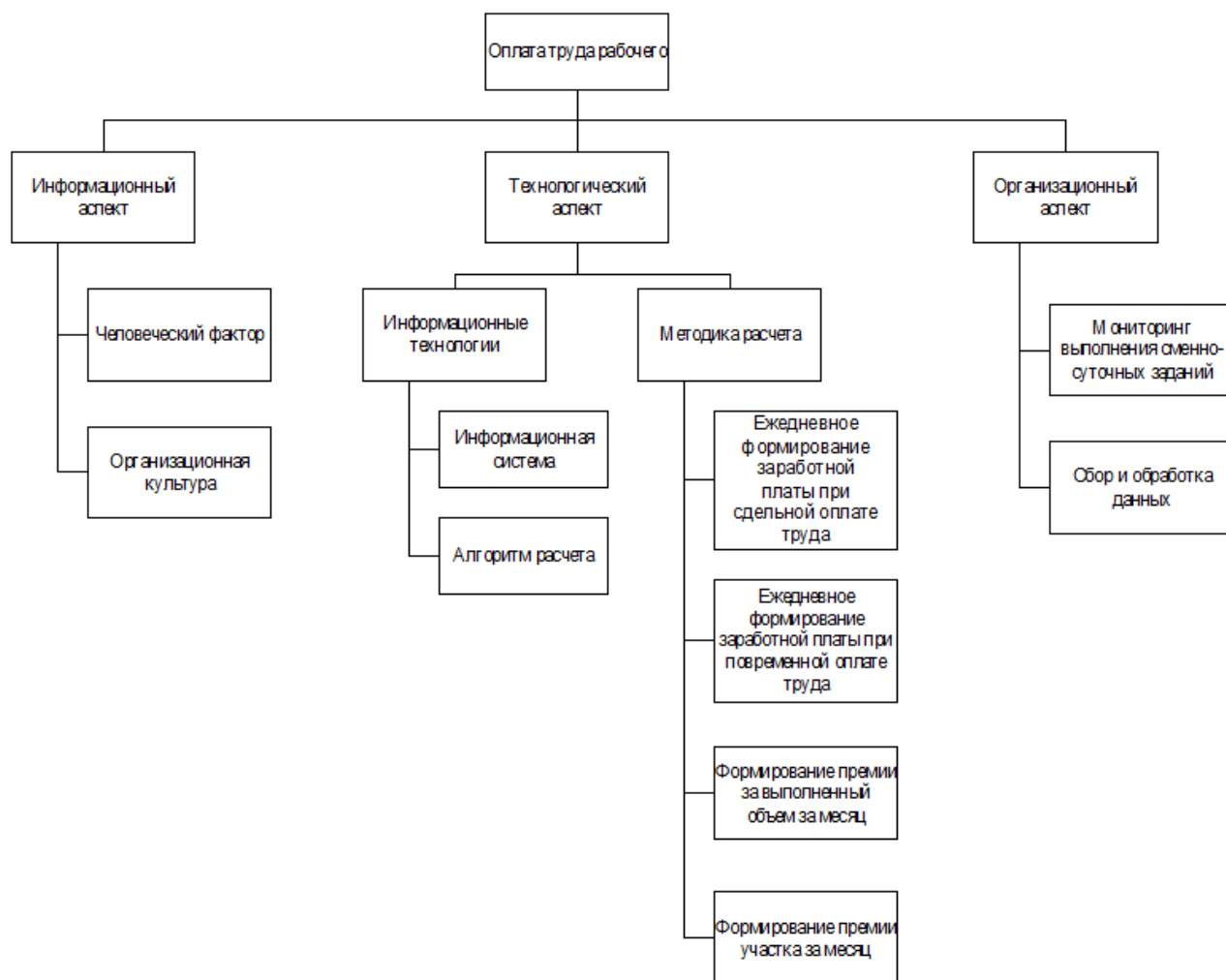


Рисунок 2. Модель формирования оплаты труда рабочего

Таблица 1. Показатели для формирования индивидуальной премии рабочим

Показатели	Расчетная формула	Составляющие формулы	Примечания
Ежедневная индивидуальная премия. Сдельная оплата труда	$\Pi_{см} = K_{см} \times \sum_{i=1}^m \Pi_i \times n_i$	$K_{см}$ – премиальный коэффициент за выполненные сменно-суточные задания; m – выполненные за смену детали-операции (1,2,3...); Π_i – стоимость i -ой детали; n_i – изготовленная партия деталей по i -ой детали-операции.	Формирование премии ведется с учетом коэффициента за выполнение норм. $K_{вн} = \frac{\sum_{i=1}^k t_i \times n_i}{T_{\phi}}$
Ежедневный индивидуальная премия. Повременная оплата труда	$\Pi_{см} = K_{см} \times z_j \times \sum_{i=1}^m t_i \times n_i$	z_j – тариф за час j -го рабочего; t_i – время на изготовление i -ой детали-операции	где k – количество детали-операций, выполненных за месяц; T_{ϕ} – месячное рабочее время. Формирование индивидуальной премии рабочего за выполнение объема за месяц $\Pi_{мо}$ в н/час происходит в конце месяца. Премия начисляется если $K_{вн} > 1$.
Премия за месяц	$\Pi_{см} = K_{мо} \times \sum_{i=1}^k t_i \times n_i$	$K_{мо}$ – премиальный коэффициент за выполненные работы	Если $K_{вн} < 1$, то премия за объем не начисляется. Формирование ведется с учетом видов работ, норм изготовления, количества заданий в смену и месяц.

Таблица 2. Показатели для формирования премии производственного участка

Показатели	Расчетная формула	Составляющие формулы	Примечания
Суммарная премия участка за месяц	$K_y = K_{yo} \times K_{yn} \times K_{yz}$	K_{yo} – объемный коэффициент выполнения в н/час; K_{yn} – номенклатурный коэффициент; K_{yz} – коэффициент межоперационного задела.	Объемный коэффициент в н/час
Количество выполненных заданий рабочим в н/час	$Q_j = \sum_{i=1}^k t_i \times n_i$	k – количество детали-операций изготовленных в течение месяца j -ым рабочим; t_j – время, затрачиваемое на изготовление i -ой детали-операции; n_j – объем изготавливаемых i -ых детали-операций	$K_{yo} = \frac{\sum_{j=1}^p Q_j}{\sum_{j=1}^p T_{\phi j}}$
Номенклатурный коэффициент выполнения плана.	$K_{yn} = \frac{H_{\phi}}{H_{пл}}$	H_{ϕ} – реальное количество изготовленных деталей (за месяц); $H_{пл}$ – плановое количество изготавливаемых деталей.	где p – число рабочих участка; Q_j – количество выполненных заданий j -ым рабочим за месяц (н/час); $T_{\phi j}$ – месячное рабочее время j -го рабочего.
Коэффициент межоперационного задела	$K_{yz} = \frac{H_3}{H_{нз}}$	$H_{нз}$ – количество деталей незавершенного производства (НЗП) (на планируемый месяц); H_{ϕ} – количество реально изготовленных деталей НЗП (за месяц).	Если коэффициент премии участка $K_y > 1$, индивидуальная премия рабочего увеличивается на расчетный коэффициент K_y .

ния, предоставляет возможность ежедневного комплектования сменно-суточных заданий рабочим, исключая малоаргументированное их формирование, основанное на личных взаимоотношениях, что позволяет справедливо распределять сменно-суточные задания между рабочими. Кроме того, появляется возможность справедливого контроля их выполнения на основании ежедневного мониторинга работ. Перечисленные мероприятия позволяют принципиально по-новому выстроить систему оплаты труда. В разработанных системах управления, в условиях цифровой трансформации, становится возможным оперативно, дифференцировано и достоверно мониторить достижения каждого рабочего и участка в целом, создавая личную мотивацию в неукоснительном соблюдении выполнения плановых сменно-суточных заданий. В результате создания и применения системы оплаты труда, позволяющей результативно и справедливо определять вклад каждого рабочего в выполнение плановых сменно - суточных заданий, растет дисциплина и производительность труда, активизируется стремление к выпуску изделий с высоким качеством, к хозяйственному подходу при расходовании материальных, энергетических и других ресурсов предприятия [4; 7; 10].

Для формализации данных, необходимых для объективного расчета заработной платы и премий рабочим разработана модель формирования оплаты труда рабочего (рисунок 2).

Модель включает в себя следующие составляющие:

- определение набора ключевых понятий;
- описание смысла ключевых понятий;
- задание правил, для расчета заработанной платы.

Для формирования бизнес-процесса начисления заработной платы, необходимо учитывать объективные и субъективные факторы, такие как внешние и внутренние воздействия на бизнес-процессы, вызывающие различные отклонения. Для устранения субъективности в начислении заработной платы необходима информация, позволяющая оценить вклад каждого рабочего в своевременное и качественное выполнение сменно-суточных заданий.

Результаты применения разработанной методики

Разработана методика расчета, учитывающая различные формы оплаты труда (сдельную и повременную), а также выполнение заданий всего участка [11; 12].

Модель включает информационный, технологический и организационный аспекты, объединя-

ющие все описанные выше факторы, влияющие на формирование заработной платы. Анализируя модель формирования оплаты труда рабочего можно увидеть, что центральное место в ней отводится непосредственно методике расчета, включающей в себя как ежедневное формирование заработной платы, так и за месяц. Нужно отметить, что премия формируется с учетом выполнения планового сменно-суточного задания по всем включенным в план позициям по всему диапазону. Если хотя бы одна позиция из сменно-суточного задания не выполнена или выполнена в меньшем количестве, чем запланировано, то премия не рассчитывается. Для повышения трудовой дисциплины, что способствует реальному отображению информации по выполненным заданиям в информационной системе, премия не начисляется и в том случае, если сменно-суточное задание выполнено в запланированном количестве, но информация по выполнению суточного плана передана в систему с нарушением сроков, которые определены приказом по предприятию [4;10].

Разработаны параметры, которые необходимо учитывать при формировании как индивидуальной премии рабочего, так и премии всего производственного участка. Индивидуальная премия формируется как при сдельной, так и при повременной оплате труда.

Показатели, для расчета индивидуальной премии рабочим сведены в таблицу 1.

Если сменно-суточные задания не выполняют в календарном месяце, происходит уменьшение премиального коэффициента за месяц [4; 10].

Показатели, для формирования премии производственного участка сведены в таблицу 2

Предприятие разрабатывает шкалу и уровень формирования индивидуального премирования рабочих в соответствии с правилами и задачами предприятия (таблица 3):

- при выполнении менее 100% сменно-суточного задания премия не начисляется;
- при выполнении сменно-суточного задания 100% премия составляет 30% от величины оклада;
- при перевыполнении плана, премия составляет 40-60% оклада.

Таблица 3. Шкала премирования рабочих

Уровень выполнения сменно-суточных заданий	Недопустимый	Плановый	Высокий
Премия в %	0	30	40-60

За выполнение плана участка по всем показателям может быть начислена дополнительная премия в размере 20%.

Применение разработанной методики привело к изменению состава заработной платы рабочих. Основная часть заработной платы зависит от личных показателей рабочего. У рабочих появляется стимул к повышению качественных и количественных показателей трудовой деятельности. В результате применения разработанной методики формирования оплаты труда и премии, возрастает эффективность и производительность труда рабочих.

Результаты, полученные с использованием созданной модели и методики формирования заработной платы (в тыс. руб.) показаны на рисунке 3 на примере токарей 3-5 разрядов.

Результаты и обсуждения

Созданная модель показывает взаимовлияние различных аспектов, оказывающих воздействие на формирование оплаты труда рабочих. Анализируя составляющие модели видим, что информационный аспект основывается на организационной культуре предприятия и человеческом факторе. Эти факторы оказывают серьезное влияние на формирование оплаты труда. Для устранения малоаргументированного субъективного влияния человеческого фактора, имеющего место в действующих системах управления, необходимо разработать методику формирования оплаты труда, исключая человеческий фактор, что возможно в условиях цифровой трансформации. Технологический аспект включает разработанную методику формирования заработной платы и премии, как каждого рабочего, так и всего участка в целом. Разработанная методика оплаты труда позволяет исключить предубежденность при комплектовании сменно-су-

точных заданий рабочим и мониторить ежедневные личные достижения рабочего на основании информации, отображаемой в системе управления на основе сбора и обработки данных, что отражается в организационном аспекте модели.

Разработанная методика является справедливым инструментом формирования заработной платы и премии, что побуждает рабочих качественно, в установленные планом временные рамки и в заданном диапазоне выполнять сменно-суточные задания.

Включение в систему премирования показателей работы участка, активизирует рабочих к соблюдению сроков выполнения плана, что позволяет получать дополнительное вознаграждение, формируемое с учетом выполнения сменно-суточных заданий рабочим, номенклатурного коэффициента выполнения плана и коэффициента межоперационного задела.

Включение в методику дополнительных поощрений возможно, если ввести показатели, характеризующие реальное использование материалов. Эти данные будут отражены в технологическом и организационном аспектах созданной модели. Сопоставляя норматив расхода и реальный расход материала, устанавливаются коэффициенты расхода как индивидуально по каждому рабочему, так и по всему участку. Если сопоставление норматива и реального расхода получается меньше единицы, то осуществляется дополнительное поощрение.

Созданная методика обеспечивает снижение рисков невыполнения плановых заданий, так как направлена на повышение дисциплины и ответственности, а так же личной материальной заинтересованности рабочих в выполнении плана с высоким качеством и в установленные планом сроки, что в конечном результате положительно сказыва-

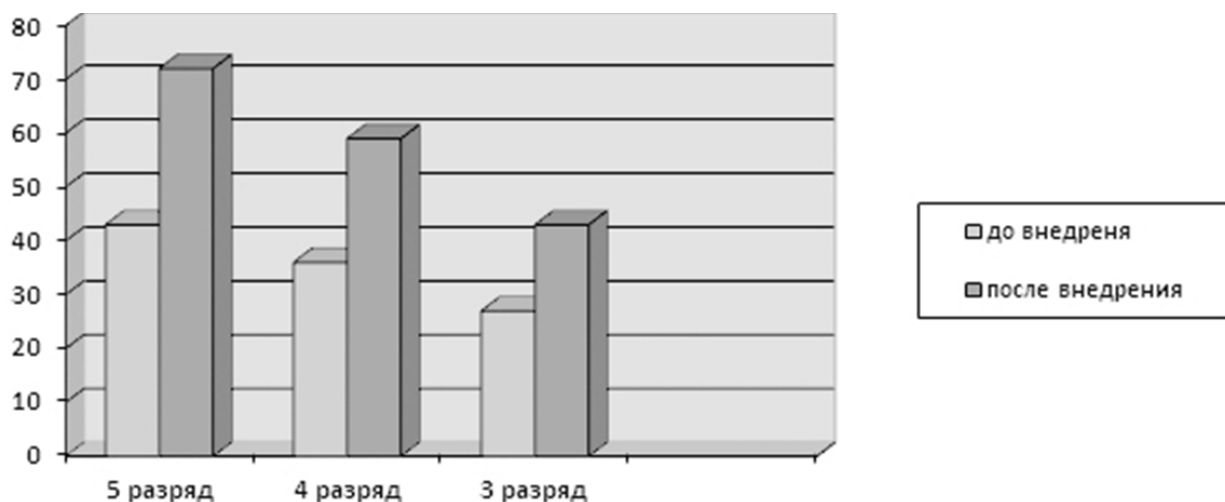


Рисунок 3. Результаты внедрения методики формирования заработной платы

ется на осуществлении планов всего предприятия, и приводит к повышению эффективности и усилению конкурентоспособности.

Заключение

Разработанная методика формирования оплаты труда, отраженная в созданной модели, является элементом сбалансированной системы показателей и позволяет мотивировать рабочих к своевременному и качественному выполнению сменно-суточных заданий в заданном диапазоне, в полном объеме и с высоким качеством. Таким образом выполняется одна из важных задач – мотивирование всех работников на достижение стратегических целей предприятия.

Список литературы

1. Волкова В.Н., Денисов А.А. Основы системной теории и системного анализа. Санкт-Петербург: СПбГУ, 2003. 520 с.
2. Дилигенский Н.В., Матвеева Е.А. Исследование системы управления предприятием на основе методов декомпозиции. Инфокоммуникационные технологии. 2011. Т. 9, № 2. С. 59–63.
3. Дилигенский Н.В., Матвеева Е.А. Концепт модели маломасштабного машиностроения в современности // Информация, Измерение и системы контроля (IUS-2010): материалы Международной научно-технической конференции. Самара, 2010. С. 286–290.
4. Интегрированные системы управления производством машиностроительных предприятий: монография / А.С. Иванова [и др.]. Самара: Ас Гард, 2011. 310 с.
5. Трофимов В.В. Информационные системы и технологии в экономике и управлении. М.: Высшее образование, 2006, 480 с.
6. Каплан Р., Нортон Д. Сбалансированная система показателей. От стратегии к действию / пер. с англ.; 2-е изд. М.: Олимп-бизнес, 2004. 320 с.
7. Симагина С.Г. Основные направления развития концепции управления трансформации // Бюллетень Московской академии следственного комитета Российской Федерации. 2022. № 1. С. 140–143.
8. Негойц К. Применение теории систем к проблемам управления. М.: Мир, 1981. 180 с.
9. Волков О.И., Девяткин О.В. Организация производства на предприятии (фирме). М.: ИТНФРА-М, 2010, 447 с.
10. Матвеева Е.А., Симагина С.Г. Оптимизация производственных процессов на предприятиях // Ключевые инженерные материалы. 2016. Т. 684. С. 409–413.
11. Андрианов А.В. Создание онтологической модели информационной и аналитической систем // Молодой ученый. 2018. № 9. С. 39–42. URL: <https://moluch.ru/archive/195/48532> (дата обращения: 10.01.2024).
12. Сердюков С.Д., Сердюкова Н.К. Разработка антологической модели туристического бизнеса // Интернет-журнал «Науковедение». 2016. Т. 8, № 3. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/58EVN316.pdf> (дата обращения: 10.01.2024).

Получено 15.01.2024

Симагина Светлана Германовна, д.э.н., профессор кафедры прикладной информатики (ПИ) Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ). 443090, Российская Федерация, г. Самара, Московское шоссе, 77. Тел. +7 927 208-23-50. E-mail: s.simagina@psuti.ru

Матвеева Елена Александровна, к.т.н., доцент кафедры ПИ ПГУТИ. 443090, Российская Федерация, г. Самара, Московское шоссе, 77. Тел. +7 904 731-39-25. E-mail: e.matveeva@psuti.ru

Черных Ольга Николаевна, к.э.н., доцент кафедры ПИ ПГУТИ. 443090, Российская Федерация, г. Самара, Московское шоссе, 77. Тел. +7 927 602-62-15. E-mail: o.chernyh@psuti.ru

Афанасьев Алексей Валерьевич, аспирант кафедры ПИ ПГУТИ. 443090, Российская Федерация, г. Самара, Московское шоссе, 77. Тел. +7 927 602-62-15. E-mail: afanasyevav@mail.ru

AN ONTOLOGICAL MODEL OF WORKERS' REMUNERATION WITHIN THE CONTEXT OF AN ENTERPRISE DIGITAL TRANSFORMATION

Simagina S.G., Matveeva E.A., Chernykh O.N., Afanasyev A.V.

*Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russian Federation
E-mail: s.simagina@psuti.ru, e.matveeva@psuti.ru, o.chernyh@psuti.ru, afanasyevav@mail.ru*

The article is devoted to issues related to the modeling of the business process of forming wages for manufacturing enterprise workers in the context of digital transformation. The importance of modeling the business process of paying workers is shown, on which the efficiency of the production process largely depends, and, accordingly, the efficiency of the enterprise as a whole. A model for the formation of workers' wages has been developed, including information, technological and organizational aspects. An objective assessment of the work of workers leads to increased motivation, high-performance and high-quality work. The application of a balanced scorecard system is shown, which makes it possible to move from strategy to operational planning, taking into account the mutual influence of four modules – financial, production, consumer and innovation. Together, these modules have a significant impact on improving the efficiency of the entire enterprise. However, without digital transformation, it is impossible to consider the innovative activity of an enterprise. In addition, it is only in the conditions of digital information that it is possible to abandon the poorly documented distribution of shift-daily tasks to workers and promptly monitor their implementation. The development of a methodology for paying workers leads to the fact that having operational results of production activities, it is possible to objectively evaluate the work of workers, monitor their activities and determine the amount of encouragement not only once a month, but also daily. The implementation of this technique allows you to activate workers to perform shift-daily tasks within the time limits set by the plan and in the prescribed range, increase production discipline, encourage economical use of material, energy and other resources. In addition, production information is promptly displayed in the management system, which allows managers to have an up-to-date picture of the production plan implementation.

Keywords: *digital transformation, modeling, methods of remuneration of workers, daily formation and accounting of shift-daily tasks, stimulation, motivation*

DOI: 10.18469/ikt.2023.21.4.15

Simagina Svetlana Germanovna, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 77, Moskovskoe shosse, Samara, 443090, Russian Federation; Professor of Applied Informatics Department, Doctor in Economic Science. Tel. +7 927 208-23-50. E-mail: s.simagina@psuti.ru

Matveyeva Elena Alexandrovna, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 77, Moskovskoe shosse, Samara, 443090, Russian Federation; Associated Professor of Applied Informatics Department, PhD in Technical Science. Tel. +7 904 731-39-25. E-mail: e.matveeva@psuti.ru

Chernykh Olga Nikolayevna, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 77, Moskovskoe shosse, Samara, 443090, Russian Federation; Associated Professor of Applied Informatics Department, PhD in Economic Science. Tel. +7 927 602-62-15. E-mail: o.chernyh@psuti.ru

Afanasyev Alexey Valerievich, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 77, Moskovskoe shosse, Samara, 443090, Russian Federation; PhD Student of Applied Informatics Department. Tel. +7 906 127-29-01. E-mail: afanasyevav@mail.ru

References

1. Volkova V.N., Denisov A.A. *Fundamentals of Systems theory and System Analysis*. Saint Petersburg: SPbGPU, 2003, 520 p. (In Russ.)
2. Diligenskiy N.V., Matveeva E.A. Investigation of enterprise management system based on decomposition methods. *Infokommunikacionnye tekhnologii*, 2011, vol. 9, no. 2, pp. 59–63. (In Russ.)
3. Diligenskiy N.V., Matveeva E.A. Conceptual model of small-scale machine-building production. *Informatsiya, Izmerenie i sistemy kontrolya (IIUS-2010): materialy Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii*. Samara, 2010, pp. 286–290. (In Russ.)
4. Ivanova A.S. et al. *Integrated Production Management Systems of Machine – Building Enterprises: Monograph*. Samara: AS Gard, 2011, 310 p. (In Russ.)
5. Trofimov V.V. *Information Systems and Technologies in Economics and Management*. Moscow: Vysshee obrazovanie, 2006, 480 p. (In Russ.)

6. Kaplan R., Norton D. *Balanced System of Indicators. From Strategy to Action*. Transl. from English, 2nd ED. Olimp-Biznes Publ., 2004, 320 p. (In Russ.)
7. Simagina S.G. The main directions of development of the management concept in the context of digital transformation. *Byulleten' Moskovskoj akademii sledstvennogo komiteta Rossijskoj Federacii*, 2022, no. 1, pp. 140–143. (In Russ.)
8. Negoice K. *Application of Systems Theory to Control Problems*. Moscow: Mir, 1981, 180 p. (In Russ.)
9. Volkov O.I., Devyatkin O.V. *Organization of Production at an Enterprise (Company)*. Moscow: INFRA-M, 2010, 447 p. (In Russ.)
10. Matveeva E.A., Simagina S.G. Manufacturing process optimization at enterprises. *Klyuchevye inzhenernye materialy*, 2016, vol. 684, pp. 409–413. (In Russ.)
11. Andrianov A.V. Designing an ontological model of an information and analytical system. *Molodoj uchenyj*, 2018, no. 9, pp. 39–42. URL: <https://moluch.ru/archive/195/48532> (accessed: 10.01.2024). (In Russ.)
12. Serdyukov S.D., Serdyukova N.K. Development of an ontological model of the subject area of tourism business. *Internet-zhurnal «Naukovedenie»*. 2016. Vol. 8. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/58EVN316.pdf> (accessed: 10.01.2024). (In Russ.)

Received 15.01.2024