

2023



2(21)

ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Infokommunikacionnye
Tehnologii

«Инфокоммуникационные технологии»

Периодический научно-технический и информационно-аналитический журнал
Том 21, № 2 (82), 2023

Учредитель и издатель журнала:

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); Шорин В.П., академик РАН (СНЦ РАН, г. Самара); Зубарев Ю.Б., член-корреспондент РАН (РАН, г. Москва); 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 им. А.Н. Туполева, г. Казань); Султанов А.Х., д.т.н., профессор (УГАТУ, 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 (УГАТУ, г. Уфа); 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., Лиманова А.И.

Редактор номера: Тарасов В.Н.

Компьютерный набор и верстка: Вукмирович Д.Д.

Корректур: 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, 2023.

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 25.01.2024
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

Логинов С.С., Буткевич Ю.Р., Сивинцева О.А.	Тестирование генераторов псевдослучайных сигналов на основе системы Лоренца	7
---	--	---

СЕТИ СВЯЗИ И МУЛЬТИСЕРВИСНЫЕ УСЛУГИ

Глушак Е.В.	Разработка модели сети 5G в программе Anylogic	13
-------------	---	----

ЛИНИИ СВЯЗИ И ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

Попов В.Б.	Исследование параметров передачи и взаимного влияния сигнально-блокировочных кабелей с токопроводящими жилами повышенной гибкости	19
------------	--	----

РАДИОПЕРЕДАЮЩИЕ И РАДИОПРИЕМНЫЕ УСТРОЙСТВА, ТЕЛЕВИДЕНИЕ

Алексеев А.В., Голушкова А.О.	Переориентация космического аппарата дистанционного зондирования Земли с помощью роторов	24
Алексеев А.В., Ефременкова В.В.	Определение условий безопасного сближения спутника-инспектора с космическим аппаратом на орбите Земли	29

ТЕХНОЛОГИИ КОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМ И СЕТЕЙ

Сударева М.Е., Яшин В.Н.	Анализ граничных задержек в сети TSN Ethernet	37
-----------------------------	--	----

НОВЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Альгашев Г.А., Солдатова О.П.	Применение современных алгоритмов компьютерного зрения для решения задачи подсчета объектов на изображении	43
Бельгер И.С., Солдатова О.П.	Итеративные адаптационные алгоритмы в многокритериальных задачах	52
Тарасов А.А., Лезина И.В.	Применение моделей искусственного интеллекта в приемо-сдаточных испытаниях	58

Сыркин И.С., Дубинкин Д.М., Садовец В.Ю.	Выбор и обоснование расположения камер системы кругового обзора на беспилотный карьерный самосвал	64
---	--	-----------

**ТЕХНОЛОГИИ РАДИОСВЯЗИ, РАДИОВЕЩАНИЯ И
ТЕЛЕВИДЕНИЯ**

Графкин А.В., Цветов В.П., Луканов А.С.	Реализация распределенной вычислительной системы для моделирования процессов радиосвязи	71
--	--	-----------

**ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ И
БЕЗОПАСНОСТЬ ОБОРУДОВАНИЯ**

Шамшаев М.Ю., Шакурский М.В.	Влияние предварительного криптографического кодирования сообщения на его обнаруживаемость в стеганографических системах	84
---	--	-----------

**УПРАВЛЕНИЕ И ПОДГОТОВКА КАДРОВ ДЛЯ
ОТРАСЛИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ**

Малина А.Б., Тарутин Н.А.	Сквозные технологии в образовательной системе вуза	89
Романенко О.В., Студяникова М.А.	Мобильный преподаватель: преимущества и недостатки в образовании	95

CONTENTS

THEORETICAL FOUNDATIONS OF INFORMATION AND SIGNAL TRANSMISSION AND PROCESSING TECHNOLOGIES

Loginov S.S., Butkevich Y.R., Sivintseva O.A.	Testing of pseudorandom signal generators based on the Lorentz system	7
--	--	----------

COMMUNICATION NETWORKS AND MULTI-SERVICES

Glushak E.V.	5G network model development in Anylogic environment	13
---------------------	---	-----------

COMMUNICATION LINES AND FIBER-OPTICS TELECOMMUNICATIONS TECHNOLOGIES

Popov V.B.	Study of transmission parameters and mutual influence of signal-blocking cables with current- conductive cores with increased flexibility	19
-------------------	--	-----------

RADIO TRANSMITTING AND RECEIVING DEVICES, TELEVISION

Alekseev A.V., Golushkova A.O.	Reorientation of the Earth remote sensing spacecraft using rotors	24
---	--	-----------

Alekseev A.V., Efremenkova V.V.	Determination of the conditions for the safe approach of an inspector satellite with a spacecraft in Earth orbit	29
--	---	-----------

COMPUTER NETS AND SYSTEMS TECHNOLOGIES

Sudareva M.E., Yashin V.N.	Analysis of boundary latencies in the TSN Ethernet network	37
---------------------------------------	---	-----------

NEW INFORMATION TECHNOLOGIES

Algashev G.A., Soldatova O.P.	Application of modern computer vision algorithms to manage with the counting of image objects	43
--	--	-----------

Belger I.S., Soldatova O.P.	Iterative adaptation algorithms in multicriteria tasks	52
--	---	-----------

Tarasov A.A., Lyožina I.V.	Use of artificial intelligence models in acceptance tests	58
---------------------------------------	--	-----------

Syrkin I.S., Dubinkin D.M., Sadovets V.Yu.	Selection and justification of the location of cameras of the all-round vision system on an unmanned dump truck	64
---	--	-----------

**RADIO TELECOMMUNICATION, RADIOBROADCASTING
AND TELEVISION TECHNOLOGIES**

Grafkin A.V., Tsvetov V.P., Lukanov A.S.	Implementation of distributed computing system for simulating of the radio communication processes	71
---	---	-----------

**ELECTROMAGNETIC CAPABILITY AND EQUIPMENT
SAFETY**

Shamshaev M.Yu., Shakurskiy M.V.	The impact of pre-cryptographic coding messages on its detectability in steganographic systems	84
---	---	-----------

**MANAGEMENT AND TRAINING FOR THE TELECOMMUNICATIONS
INDUSTRY**

Malina A.B., Tarutin N.A.	Research and implementation of end-to-end technologies into the educational system of the university	89
Romanenko O.V., Studyannikova M.A.	Mobile teacher: advantages and disadvantages in education	95

«Infokommunikacionnye tehnologii»

Periodic technical and scientific information and analytical magazin
2023, vol. 21, no. 2 (82)

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);

Shorin V.P., Academic Professor RAS (Russian Academy of Sciences, Samara);

Zubarev U.B., RAS Corresponding Member (RAS, Moscow);

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);

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

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

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

Federal State Educational Budgetary Institution of Higher Professional Education

«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 621.396

ТЕСТИРОВАНИЕ ГЕНЕРАТОРОВ ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫХ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ ЛОРЕНЦА

Логинов С.С., Буткевич Ю.Р., Сивинцева О.А.

Казанский национальный исследовательский технический университет

имени А.Н. Туполева-КАИ, Казань, РФ

E-mail: bytkevic@mail.ru

В данной работе представлены результаты тестирования модифицированных генераторов псевдослучайных сигналов. Рассмотрены два генератора, построенных на основе системы Лоренца с хаотической динамикой. Первый генератор описывается системой Лоренца, реализованной над полем Галуа, а второй описывается системой Лоренца, в которой формирование цифровой последовательности происходит методом периодической выборки из сигнатур сигналов. В качестве дополнительного подтверждения релевантности полученных результатов в работе оценивается генератор, построенный на основе стандартной функцией Matlab по формированию бинарной случайной последовательности. Тестирование генераторов осуществлялось с помощью набора тестов, разработанного Национальным институтом стандартов и технологий, который включает в себя 15 различных тестов. Полученные результаты сравниваются с результатами, полученными при тестировании эталонных генераторов. Результаты данного исследования могут быть применены при построении криптографических систем и систем передачи информации.

Ключевые слова: генераторы псевдослучайных сигналов, система Лоренца, поля Галуа, тесты NIST

Введение

Генераторы псевдослучайных чисел являются ключевым звеном любой криптографической системы. Надежность таких систем обусловлена статистическими свойствами последовательностей, формируемых генераторами. Поэтому создание генераторов псевдослучайных чисел с характеристиками, наиболее близкими к характеристикам случайных чисел, является важной и актуальной задачей.

Одним из источников формирования псевдослучайных последовательностей с требуемыми статистическими характеристиками в системах передачи информации может служить динамический хаос, который обеспечивает возможность существования сложного, непредсказуемого поведения. Динамический хаос, в отличие от шума, являющегося случайным процессом, описывается детерминированными системами уравнений. На сегодняшний день известны нелинейные динамические системы Лоренца, Ресслера, Дмитриева-Кислова, генераторы с инерционной нелинейностью Анищенко-Астахова, осциллятор Ван-дер-Поля и другие [1–3].

В данной работе проводятся исследования двух модифицированных генераторов с псевдослучайных сигналов на базе динамической системы Лоренца. В первом случае рассматривается система Лоренца, где операции выполняются над полем Галуа, а во втором случае используется система Лоренца в условиях квазирезонанс-

ных воздействий, где формирование цифровой последовательности происходит методом периодической выборки из сигнатур сигналов.

Одним из методов оценки качества генераторов псевдослучайных чисел является тестирование «на случайность» полученных последовательностей. Для тестирования последовательностей и определения их схожести со случайной существуют различные наборы тестов: Д. Кнута, Crypt-X, FIPS 140-2, NIST и др. [4].

В работе применяется набор статистических тестов NIST, разработанный Национальным институтом стандартов и технологий (National Institute of Standards and Technology).

Целью работы является сопоставительный анализ модифицированных генераторов псевдослучайных сигналов на основе системы Лоренца с помощью набора тестов NIST.

Динамические системы Лоренца

Высокие требования к безопасности систем передачи информации делает актуальным применение в таких системах криптографических и некриптографических методов защиты на основе хаотической динамики.

Однако, реализация генераторов хаоса на основе цифровой схемотехники оказывается до-вольно сложной за счет применения операций с плавающей/фиксированной запятой. В связи с этим предлагается использовать более удобные для реализации в цифровой форме модифициро-

ванные генераторы псевдослучайных сигналов. Например, генераторы с выполнением операций над полями Галуа [5–6].

В данной работе в качестве исходной системы была выбрана нелинейная динамическая система Лоренца. После ее модификации и реализации операций уравнения в полях Галуа система описывается следующим уравнением:

$$\begin{cases} X_{i+1} = X_i \oplus t \otimes (\sigma \otimes X_i \oplus \sigma \otimes Y_i); \\ Y_{i+1} = Y_i \oplus t \otimes (r \otimes X_i \oplus Y_i \oplus X_i \otimes Z_i); \\ Z_{i+1} = Z_i \oplus t \otimes (b \otimes Z_i \oplus X_i \otimes Y_i). \end{cases} \quad (1)$$

где t – шаг интегрирования; r , σ , b – параметры системы, все операции выполняются над полем Галуа.

С целью проведения более полного исследования в работе также рассматривается генератор псевдослучайных сигналов с управляемыми характеристиками, основанный на системе Лоренца в условиях квазирезонансных воздействий, где формирование последовательности происходит методом выборки полученной реализации через равные промежутки времени (1):

$$\begin{cases} X_{i+1} = X_i + t_i \cdot (-\sigma \cdot X_i + -\sigma \cdot Y_i); \\ Y_{i+1} = Y_i + t_i \cdot (r \cdot X_i - Y_i - X_i \cdot Z_i); \\ Z_{i+1} = Z_i + t_i \cdot (-b \cdot Z_i + X_i \cdot Y_i). \end{cases}$$

где $t_i = \Delta t(1 + mf_{i-1})$, $f_{i-1} = \text{sgn}\left(\frac{|X_i|}{X^*} \pm a\right)$ – временная функция управляющего воздействия, Δt – величина шага, $a = X / X_{01}$, m – глубина модуляции.

Тесты NIST

В 1999 г. Национальным институтом стандартов и технологий был разработан набор статистических тестов NIST, на основе которых была предложена методика тестирования генераторов псевдослучайных чисел [7].

Статистические тесты являются мерой определения степени случайности последовательностей, создаваемых генераторами псевдослучайных сигналов. Тесты NIST представляют собой 15 тестов, в основе которых лежит принцип определения статистики, характеризующей некое свойство последовательности, с последующим ее сравнением с эталонной статистикой, полученной от случайной последовательности [8].

Рассмотрим подробно каждый из тестов:

1. Частотный (монобитный) тест определяет соотношение нулей и единиц в последовательности.
2. Частотный блочный тест определяет соотношение количества единиц и нулей в блоке длиной m (в данном исследовании $m = 3$).
3. Тест на последовательность одинаковых битов, в ходе которого определяется скорость че-

редования единиц и нулей.

4. Тест на нахождение наиболее длинной последовательности единиц в блоке определяет самый длинный ряд единиц внутри блока длиной m бит. Длина блока определяется динамически из длин 8, 128 и 10000 в зависимости от длины последовательности. Тест может проводиться несколько раз до окончания исходной последовательности.

5. Тест рангов бинарных матриц производит подсчет рангов непересекающихся подматриц, построенных из исходной бинарной последовательности (данный тест не проводился ввиду того, что длина исходной последовательности меньше 38912).

6. Спектральный тест, который оценивает пики после дискретного преобразования Фурье исходной бинарной последовательности.

7. Тест приближительной энтропии, подсчитывающий частоты всех возможных перекрытий шаблонов длины m бит (в данном исследовании $m = 3$).

8. Тест на совпадение неперекрывающихся шаблонов, в котором подсчитывается количество заранее определенных шаблонов, найденных в исходной последовательности (длина шаблона принята равной 9).

9. В тесте на совпадение перекрывающихся шаблонов в отличие от теста № 8 поиск шаблона происходит со смещением на 1 бит (длина шаблона принята равной 3).

10. Тест на периодичность, ведущий подсчет частот всех возможных перекрытий шаблонов длины m бит на протяжении исходной последовательности битов.

11. Тест на произвольные отклонения – набор из восьми тестов, проводимых для каждого из восьми состояний цикла (-4 -3 -2 -1 1 2 3 4), представляющего серию случайных шагов единичной длины.

12. Разновидность теста на произвольные отклонения, отличающегося от предыдущего теста количеством анализируемых состояний (от -9 до 9 с шагом 1).

13. Тест на линейную сложность анализирует исходную последовательность по принципу работы линейного регистра сдвига с обратной связью.

14–15) Тест кумулятивных сумм находит отклонения от нуля при произвольном обходе, определяемом кумулятивной суммой биполярной исходной последовательности, тест № 14 и тест № 15 отличаются началом отсчета от начала или от конца исходной биполярной последовательности.

Таблица 1. Результаты прохождения тестов NIST разными генераторами псевдослучайных сигналов

№ ген.	№1	№2	№3	№4	№6	№7	№8	№9	№10	№11	№12	№13	№14	№15	№16
1	9909	9978	9887	0	9884	9995	0	14	7489	5019	8944	10000	4898	4887	10000
2	9455	5310	3183	0	9870	6371	0	0	644	5011	9051	10000	4922	4942	10000
3	9907	9990	9905	0	9878	9995	0	7	7442	4978	8984	10000	4846	4830	10000

Таблица 2. Результаты определения доверительных интервалов на основе проведенных тестов

№ ген.	1			2			3		
	P_H	P	P_B	P_H	P	P_B	P_H	P	P_B
1	0,9876	0,9909	0,9933	0,9383	0,9455	0,9519	0,9873	0,9907	0,9932
2	0,9959	0,9978	0,9988	0,5160	0,5310	0,5459	0,9975	0,9990	0,9996
3	0,9851	0,9887	0,9915	0,3045	0,3183	0,3324	0,9871	0,9905	0,9930
4	$1,08 \cdot 10^{-19}$	0	$8,99 \cdot 10^{-4}$	$1,08 \cdot 10^{-19}$	0	$8,99 \cdot 10^{-4}$	$1,08 \cdot 10^{-19}$	0	$8,99 \cdot 10^{-4}$
6	0,9847	0,9884	0,9912	0,9831	0,9870	0,9900	0,9840	0,9878	0,9907
7	0,9982	0,9995	0,9999	0,6226	0,6371	0,6514	0,9982	0,9995	0,9999
8	$1,08 \cdot 10^{-19}$	0	$8,99 \cdot 10^{-4}$	$1,08 \cdot 10^{-19}$	0	$8,99 \cdot 10^{-4}$	$1,08 \cdot 10^{-19}$	0	$8,99 \cdot 10^{-4}$
9	$6,41 \cdot 10^{-4}$	0,0014	0,0031	$1,08 \cdot 10^{-19}$	0	$8,99 \cdot 10^{-4}$	$2,38 \cdot 10^{-4}$	$7,00 \cdot 10^{-4}$	0,0021
10	0,7357	0,7489	0,7617	0,0574	0,0644	0,0722	0,7309	0,7442	0,7571
11	0,4869	0,5019	0,5169	0,4861	0,5011	0,5161	0,4828	0,4978	0,5128
12	0,8848	0,8944	0,9033	0,8959	0,9051	0,9135	0,8890	0,8984	0,9071
13	0,9991	1	1	0,0914	0,1000	0,1094	0,9991	1	1
14	0,4748	0,4898	0,5048	0,4772	0,4922	0,5072	0,4696	0,4846	0,4996
15	0,4737	0,4887	0,5037	0,4792	0,4942	0,5092	0,4680	0,4830	0,4980
16	0,0913	0,1000	0,1094	0,9991	1	1	0,9991	1	1

16) Универсальный статистический тест Маурера определяет число бит между одинаковыми шаблонами в исходной последовательности.

Результаты тестирования

В данной работе проводились тестирование и сравнительный анализ генераторов псевдослучайных последовательностей. Анализ проводился на основе оценки прохождения или непрохождения последовательностей вышеописанных тестов, формируемых генераторами.

В ходе эксперимента сравнивались три генератора. Генератор № 1 является генератором псевдослучайных сигналов на основе системы Лоренца, где операции уравнений реализованы в полях Галуа. Генератор № 2 построен на основе системы Лоренца, подверженной квазирезонансным воздействиям. В качестве дополнительного подтверждения релевантности был предложен Генератор № 3, являющийся стандартной функцией Matlab по формированию бинарной случайной последовательности. Алгоритм генерации в генераторе № 3 основан на линейном конгруэнтном методе.

Формирование последовательностей генераторами № 1 и № 2 осуществлялось при случайных начальных условиях, а генератор № 3 перезапускался при каждом опыте. Было проведено 10000 опытов, результаты прохождения тестов NIST приведены в таблице 1.

На основе проведенных опытов определена вероятность прохождения каждого теста, а также оценена точность и надежность полученных результатов. Точность и надежность оценивалась с помощью доверительного интервала. На основе проведения бесконечно большого количества испытаний может быть получено некоторое эталонное значение вероятности события. В реальности число проводимых испытаний всегда ограничено, из-за чего вместо эталонного значения вероятности вычисляется значение на основе этих испытаний. Такая замена параметра неизбежно приведет к появлению ошибки, выражающейся в колебании значения вероятности прохождения теста на некотором интервале $P_H < P < P_B$. Вероятность попадания в заданный интервал равна числу, за-

висящему от ширины указываемых границ. Доверительные интервалы (при) для каждого теста и каждого генератора приведены в таблице 2.

Генератор № 1 прошел тесты № 1–3, 6–7, 12–13, 16 с вероятностью более 89%, тесты № 10–11, 14–15 с вероятностью более 48%. Тесты № 4, № 8–9 не были пройдены.

В то же время, Генератор № 2 прошел тесты № 1, 6, 12–13, 16 с вероятностью более 90%, тесты № 2,7,11 с вероятностью более 50%, тесты № 3, 10, 12–15 с вероятностью менее 50%. Тесты № 4, № 8–9 не были пройдены.

Генератор № 3 прошел тесты № 1–3, 6–7, 12–13, 16 с вероятностью более 89%, тесты № 10–11, 14–15 с вероятностью более 48%. Тесты № 4, № 8–9 не пройдены. Генераторы № 1, № 3 показали схожие результаты.

Вероятность одновременного прохождения 86,6% тестов NIST Генератором № 1 составляет 7,77%, Генератором № 2 – 0,07%, генератором № 3 – 7,53%. Исходя из полученных результатов, ни один из генераторов не проходит тесты № 4, № 8, № 9, следовательно, и не проходит полный набор тестов NIST.

Отметим, что в методических рекомендациях к NIST [9] приведены результаты прохождения тестов эталонными генераторами. Например, генератор возведения в степень по модулю (Modular Exponentiation) и генератор, выполняющий операцию исключающую ИЛИ (XOR), также, как и вышеописанные нами генераторы, не проходят тесты № 8 и № 9. Кроме того, генератор Modular Exponentiation не проходит тесты № 1, 3, 12, 7, 8, 14, 15. Расширенные результаты тестирования представлены в Приложении D работы [9].

В отличие от эталонных генераторов из [9], рассмотренные в данной работе генераторы не проходят тест № 4, тест на самую длинную последовательность единиц в блоке. Это связано с тем, что длина блока определяется динамически из длин 8, 128 и 10000.

Ранее в работе [10] проводилось тестирование генератора на основе системы Лоренца, реализованной в полях Галуа, с помощью другого набора тестов FIPS-140-2, и полученные последовательности успешно прошли проверку «на случайность» по результатам тестирования. Таким образом, можно сделать вывод, что тесты NIST предъявляют более расширенные требования по сравнению с тестами FIPS-140-2.

Заключение

В данной работе представлены результаты тестирования модифицированных генераторов

псевдослучайных сигналов. Рассмотрены два генератора на основе динамической системы Лоренца. Генератор № 1 построен на основе системы Лоренца, в которой операции уравнений реализованы в полях Галуа, Генератор № 2 основан на системе Лоренца, в которой формирование цифровой последовательности происходит методом периодической выборки из сигнатур сигналов.

В качестве дополнительного подтверждения релевантности был предложен Генератор № 3, являющийся стандартной функцией Matlab по формированию двоичной случайной последовательности.

Тестирование вышеописанных генераторов осуществлялось с помощью набора тестов NIST, разработанного Национальным институтом стандартов и технологий.

Генератор № 1 с вероятностью более 89% прошел тесты № 1–3, 6–7, 12–13, 16. Генератор № 2 с вероятностью более 90% прошел тесты № 1, 6, 12–13, 16. Генератор № 1 прошел больше тестов, чем Генератор № 2.

Генератор № 3, реализованный на алгоритме работы Matlab, с вероятностью более 89% прошел тесты № 1–3, 6–7, 12–13, 16.

Проведенные тесты NIST показали, что генератор № 1 на основе системы Лоренца, в которой операции уравнений реализованы в полях Галуа, обеспечивает характеристики, сопоставимые с встроенным генератором псевдослучайных сигналов Matlab.

Кроме того, представление в данной работе генераторы показали результаты релевантные результатом для эталонных генераторов: Modular Exponentiation, XOR и др.

Литература

1. Логинов С.С., Зуев М.Ю. Статистические характеристики генераторов псевдослучайных сигналов на основе систем Лоренца, Чуа и Дмитриева-Кислова, реализованных над конечным полем Галуа // Инженерный вестник Дона. 2018. № 4 (51). С. 1–13.
2. Зуев М. Ю., Кафаров К.М., Логинов С.С. О взаимосвязи показателей хаотической динамики и статистических характеристик псевдослучайных сигналов на основе нелинейных систем Лоренца и Чуа // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2021. № 2 (50). С. 21–29.
3. Логинов С.С., Зуев М.Ю., Агачева Я.Г. Генератор псевдослучайных сигналов на основе системы Лоренца, подверженной квазирезонанс-

- ным воздействиям // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы: материалы XXIII международной научной конференции. СПб: Изд-во ГУАП, 2020. Т. 1. С. 284–290.
4. Григорьев А.Ю. Методы тестирования генераторов случайных и псевдослучайных последовательностей // Ученые записки УдГУ. Серия: Математика и информационные технологии. 2017. № 1. С. 22–28.
 5. Зуев М.Ю. Комплексное повышение эффективности радиоэлектронных устройств и систем передачи информации с OFDM на основе нелинейных систем с динамическим хаосом // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2022. Т. 25, № 1. С. 55–64.
 6. Логинов С.С. Формирователи псевдослучайных сигналов на основе модифицированной системы Лоренца, реализованной над конечным полем Галуа // Нелинейный мир. 2017. Т. 15, № 5. С. 26–29.
 7. Вильданов Р.Р., Мещеряков Р.В., Бондарчук С.С. Тесты псевдослучайных последовательностей и реализующее их программное средство // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2012. № 1-2 (25). С. 108–111.
 8. Перов А.А. Применение статистических тестов NIST для анализа выходных последовательностей блочных шифров // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2019. № 3 (76). С. 87–96.
 9. A Statistical Test Suite for Random and Pseudorandom Number Generators for Cryptographic Applications /A.L. Rukhin [et al.]. USA: National Institute of Standards and Technology, 2010. 131 p.
 10. Логинов С.С., Зуев М.Ю. Тестирование генераторов псевдослучайных сигналов на основе системы Лоренца, реализованной над конечным полем Галуа // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2018. № 1 (9). С. 111–114.

Получено 23.10.2023

Логинов Сергей Сергеевич, д.т.н., доцент кафедры электронных и квантовых средств передачи информации (ЭКСПИ) Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева-КАИ (КНИТУ-КАИ). 420111, Российская Федерация, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Карла Маркса, д. 10. Тел. +7 905 023-67-99. E-mail: sslogin@mail.ru

Буткевич Юрий Рудольфович, аспирант кафедры ЭКСПИ КНИТУ-КАИ. 420111, Российская Федерация, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Карла Маркса, д. 10. Тел. +7 986 929-15-91. E-mail: bytkevic@mail.ru

Сивинцева Ольга Андреевна, аспирант кафедры ЭКСПИ КНИТУ-КАИ. 420111, Российская Федерация, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Карла Маркса, д. 10. Тел. +7 960 033-66-55. E-mail: sivinceva96@mail.ru

TESTING OF PSEUDORANDOM SIGNAL GENERATORS BASED ON THE LORENTZ SYSTEM

*Loginov S.S., Butkevich Y.R., Sivintseva O.A.
Kazan National Research Technical University named after
A.N. Tupolev-KAI, Kazan, Russian Federation
E-mail: bytkevic@mail.ru*

This work presents results of the testing of modified pseudorandom signal generators. Two generators developed on the basis of the Lorentz system with chaotic dynamics are considered. The first generator is described by the Lorentz system implemented over a Galois field, and the second is described by the Lorentz system in which digital sequence formation occurs by periodic sampling from signal signatures. As an additional confirmation of the relevance of the results obtained, the article evaluates a generator developed on the basis of the standard Matlab function for binary random sequence generating. Generator testing was carried out using a test battery developed by the National Institute of Standards and Technology, which includes 15 different tests. The results obtained are compared with the results obtained by testing reference generators. The results of this research can be applied in the development of cryptographic and data transmission systems.

Keywords: pseudorandom signal generators, Lorentz system, Galois fields, NIST tests

DOI: 10.18469/ikt.2023.21.2.01

Loginov Sergey Sergeevich, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI, 10, Karl Marx Street, Kazan, Republic of Tatarstan, 420111, Russian Federation; Associate Professor of Electronic and Quantum Means of Information Transmission Department, Doctor of Technical Sciences. Tel. +7 905 023-67-99. E-mail: sslogin@mail.ru

Butkevich Yuri Rudolfovich, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI, 10, Karl Marx Street, Kazan, Republic of Tatarstan, 420111, Russian Federation; PhD Student of Electronic and Quantum Means of Information Transmission Department. Tel. +7 986 929-15-91. E-mail: bytkevic@mail.ru

Sivintseva Olga Andreevna, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI, 10, Karl Marx Street, Kazan, Republic of Tatarstan, 420111, Russian Federation; PhD Student of Electronic and Quantum Means of Information Transmission Department. Tel. +7 960 033-66-55. E-mail: sivinceva96@mail.ru

References

1. Loginov S.S., Zuev M.Yu. Statistical characteristics of pseudorandom signal generators based on Lorentz, Chua and Dmitriev-Kislov systems, implemented over a finite Galois field. *Inzhenernyj vestnik Dona*, 2018, no. 4 (51). pp. 1–13. (In Russ.)
2. Zuev M. Yu., Kafarov K. M., Loginov S. S. On the relationship between indicators of chaotic dynamics and statistical characteristics of pseudo-random signals based on nonlinear Lorentz and Chua systems. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Radiotekhnicheskie i infokommunikacionnye sistemy*, 2021. no. 2 (50). pp. 21–29. (In Russ.)
3. Loginov S.S., Zuev M.Yu., Agacheva Ya.G. Pseudorandom signal generator based on the Lorentz system subject to quasi-resonant influences. *Volnovaya elektronika i infokommunikacionnye sistemy: materialy XXIII mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii*. Saint Petersburg: Izd-vo GUAP, 2020, vol. 1, pp. 284–290. (In Russ.)
4. Grigoriev A.Yu. Methods of testing generators of random and pseudorandom sequences. *Uchenye zapisi UdGU. Seriya: Matematika i informacionnye tekhnologii*, 2017, no. 1, pp. 22–28. (In Russ.)
5. Zuev M.Yu. Complex improvement of the efficiency of radio-electronic devices and information transmission systems with OFDM based on nonlinear systems with dynamic chaos. *Physics of wave processes and radio engineering systems*, 2022, vol. 25, no. 1, pp. 55–64. (In Russ.)
6. Loginov S.S. Modified Lorenz system based pseudorandom numbers generator. *Nelinejnyj mir*, 2017, vol. 15, no. 5. pp. 26–29. (In Russ.)
7. Vildanov R.R., Meshcheryakov R.V., Bondarchuk S.S. Tests of pseudo-random sequences and implementing their software. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki*, 2012, no. 1-2 (25), pp. 108–111. (In Russ.)
8. Perov A.A. Using NIST statistical tests for the analysis of the output sequences of block ciphers. *Nauchnyj vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2019, no. 3 (76), pp. 87–96. (In Russ.)
9. Rukhin A.L. et al. *A Statistical Test Suite for Random and Pseudorandom Number Generators for Cryptographic Applications*. USA: National Institute of Standards and Technology, 2010, 131 p.
10. Loginov S.S., Zuev M.Yu. Testing pseudorandom signal generators based on the Lorentz system implemented over a finite Galois field. *Sistemy sinhronizacii, formirovaniya i obrabotki signalov*, 2018, no. 1 (9), pp. 111–114. (In Russ.)

Received 23.10.2023

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ СЕТИ 5G В ПРОГРАММЕ ANYLOGIC

Глушак Е.В.

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ

E-mail: evglushak@yandex.ru

В данной статье были проанализированы существующие программы для моделирования сетей пятого поколения. В выбранной программе AnyLogic была создана модель сети 5G с несколькими базовыми станциями, которые имеют разные характеристики. Проведены исследования этой модели с учетом различных дисциплин очереди, выполнен расчет нагрузки на каждую станцию при различных приоритетах. Доказано, что эту модель можно будет использовать для исследования и оценки эффективности передачи данных в сети 5G, а также для анализа влияния характеристик дополнительных параметров (задержки, нагрузки и приоритетов) на качество обработки пакетов данных. Доказано, что разработанная модель сети 5G может помочь операторам связи оптимизировать работу своих сетей и обеспечить более эффективное использование выделенных ресурсов.

Ключевые слова: сети 5G, задержка, потери пакетов, передача данных, базовые станции, программа AnyLogic, время обслуживания, очередь, нагрузка на сеть

Введение

Для начала напомним, что 5G является пятым поколением мобильной связи. Вокруг 5G создается целая сеть возможностей, и технологии, основанные на ней, будут активно развиваться в ближайшие годы. Принцип работы 5G похож на предыдущие поколения, когда данные передаются от «сот», или базовой станции, на локальную антенну устройства. Соединяясь между собой по радиоволнам определенного частотного диапазона, эти базовые станции образуют глобальную сотовую сеть.

Основное различие между поколениями состоит в технической составляющей, где 5G имеет более высокие скорости, большую пропускную способность и более короткое время задержки по сравнению с предыдущими поколениями благодаря использованию большего количества антенн. Ключевое отличие – в частотных диапазонах: сотовые сети впервые в истории используют миллиметровый диапазон, который позволяет достичь максимальной теоретической скорости в 20 Гбит/с – это в 20 раз быстрее, чем пиковые скорости 4G [1].

Цель данной работы – создать модель сети 5G в среде AnyLogic для дальнейших исследований. Основной задачей исследования является создание модели сети 5G с несколькими базовыми станциями и различными характеристиками. А также проведение оценки эффективности передачи данных в сети.

Многие ученые, проводившие исследования сетей 5G с помощью моделирования [3–5] не учитывали различные варианты алгоритмов обработки очереди, не рассматривали, как изменятся значения задержек при передаче данных и количество потерянных пакетов при увеличении или уменьшении количества базовых станций, не рассматривались мо-

дели, состоящие из нескольких базовых станций. На основе этого сделаем вывод о целесообразности разработки модели сети 5G, с помощью которой можно будет проводить различные исследования, и которая будет учитывать перечисленные выше параметры.

Разработка модели сети 5G в среде AnyLogic

Имитационное моделирование сетей 5G широко используется для исследований. Сети 5G можно реализовывать в различных программах моделирования с целью дальнейших исследований. Рассмотрим несколько программ [6]:

1. 5G Toolbox обеспечивает стандартно-совместимые функции и справочные примеры для моделирования, симуляции и верификации систем связи 5G. Toolbox позволяет симулировать уровень ссылки, проверять соответствие стандартам и генерировать тестовые сигналы.

2. GNS3 – популярная программа для эмуляции сетей, которая помогает наблюдать за взаимодействием сетевых устройств и изучать различные топологии. В ней, как и в других перечисленных программных пакетах, можно реализовать сети 5G.

3. OMNeT++ – это программа для моделирования различных сетей связи, имеющая необходимые компоненты для моделирования, в том числе, сетей 5G на C++. OMNeT++ можно бесплатно использовать для некоммерческих симуляций, например, в академических учреждениях и для преподавания. Данная программа подходит для моделирования сетей 5G [7].

4. AnyLogic – это мультиметодный инструмент для имитационного моделирования, раз-

работанный компанией AnyLogic (ранее XJ Technologies). Он умеет моделировать процессы с помощью методологий, основанных на агентах, заявках, а также очереди и др.

В данном случае для исследования сети 5G использовалась программа AnyLogic, так как она имеет необходимые инструменты и проста в использовании. С использованием AnyLogic была создана модель сети 5G, демонстрирующая возможность распределения устройств с применением различных алгоритмов управления трафиком.

Модель показывает, как устройства подключаются к станциям 5G. Станции соединены коммутаторами (6 станций на 1 коммутатор). Такие станции могут быть распределены по различным странам по всему миру. Для наглядности рассмотрим данную схему на Объединенных Арабских Эмиратах (ОАЭ) оператора Etisalat.

Etisalat выделил поддерживающие приложения, в том числе массовые коммуникационные решения M2M, сетевое взаимодействие между устройствами в режиме реального времени, сверхнадежные функции с низкой задержкой для автономных устройств и устройств Интернета вещей следующего поколения (IoT). Кроме того, в данных сетях обеспечивается дополнительная пропускная способность и меньшая задержка, обеспечивая возможности Интернета вещей, коммерческой дополненной и виртуальной реальности и крупномасштабного использования датчиков.

В AnyLogic созданы следующие типы агентов для моделирования сети 5G [8]:

1. Base – описывает базовые станции, с которыми взаимодействуют устройства абонентов (телефоны, автомобили, устройства IoT).

2. DataCenter – описывает центры, которые предоставляют услуги абонентам (телефонная связь, мобильный интернет, IoT).

3. Sub – описывает абонентов, которые сначала подключаются к базовым станциям, а затем их данные отправляются в сеть виртуализации для доступа к необходимым услугам.

4. SubToCenter – описывает все соединения абонентов с дата-центрами.

5. Simulation – запускает моделирование.

Тип агента Main. Рабочая область представляет собой графическое изображение различных уровней сети 5G и схематическое изображение компонентов библиотеки моделирования производственных процессов и систем. Логическая цепь используется для генерации случайных абонентов и передачи их на обработку.

Каждый элемент логической цепи использует информацию об абонентах, которая хранится в классе Sub. Вначале будут реализованы агенты-абоненты с

интенсивностью 0,5 в секунду. Затем агенты перемещаются к первому конвейеру с помощью блока queue (он используется для ожидания, если конвейер заполнен). Компонент конвейера отображается на графике с помощью заданных свойств (рисунок 1).

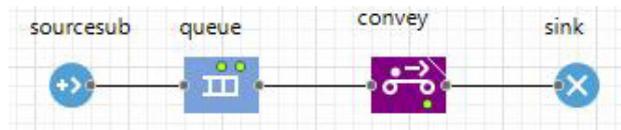


Рисунок 1. Логическая цепь устройств в программе AnyLogic

На уровне сети с базовыми станциями располагаются агенты типа Base, которые имитируют базовые станции RAT (Radio Access Technology). Агенты этого типа объединены в группу base и расположены в определенном месте [9]. Их координаты берутся из двумерной матрицы baseLoc и присваиваются свойствам группы base.

В данном случае, индекс (index) используется как порядковый номер агента при обращении к двумерному массиву baseLoc. Размер этого массива совпадает с количеством агентов в популяции и составляет 10 базовых станций. Каждый агент-абонент добавляется в группу абонентов (subs) для сбора статистики о количестве абонентов разного типа (сколько IoT-устройств, сколько смартфонов, сколько автомобилей и т. д.) в данный момент, подключенных к дата-центру, тип агента Base.

Модель содержит анимацию изображений станций, коммутаторов и шестиугольников белого цвета для обозначения активных сот. Видимость шестиугольника соты определяется переменной ceil, которая может принимать значения от 1 до 6, в зависимости от того, установлена ли связь с абонентом. Отображается тот шестиугольник, порядковый номер которого совпадает со значением переменной ceil.

Такая логика задается кодом в свойстве отображения шестиугольников. Значение links содержит число возможных подключений к абонентам в определенный момент времени. В группе агентов base используется тип агента Base и задается один элемент статистики, в котором суммируются значения переменной links для всех станций.

Рассмотрим тип агента Sub. В типе агента Sub располагается информация о абонентах и их подключениях к базовым станциям.

Диаграмма состояния включает в себя переход transition, который запускается каждые 0,1 секунды, чтобы конец линии связи от абонента возвращался в точку положения базовой станции. Направление и скорость перемещения конвейера - 2 м/с. Выбор интервала перехода 0,1 обеспечивает плавное возвращение конца линии в начальное положение.

данным вероятностям. Эти блоки используются для направления потоков данных на различные станции в зависимости от характеристик этих вышек, таких как загруженность или приоритет. Несколько блоков Select Output имеют вероятность 0,4, а несколько от 0,5 до 0,7. Данный параметр определяет нагрузку на базовую станцию.

2. Блоки Queue (блоки очереди) моделируют очередь из поступающих на них агентов, которые ждут дальнейшей обработки. Первые блоки принимают и передают информацию в определенном порядке, т. е. согласно приоритету. Последний блок объединяет в себе все поступающие в него данные. Последние три блока принимают и передают данные, основываясь на приоритете и задержке. Для блоков Queue установлен параметр «емкость», который указывает, сколько агентов может хранить в себе каждый конкретный блок. В нашем случае 80 агентов.

3. Блоки Delay определяют задержку агентов на определенный период времени. Первый блок устанавливает время задержки для входов с вышек. Блоки Sink подсчитывают поступающие в них пакеты данных. Некоторые из них считают необработанные пакеты данных, поступающие от башен, а последний считает общее количество обработанных пакетов.

Помимо схемы с приоритетами, можно реализовать схему FIFO (First In, First Out – первый пришел, первый обслужился) и LIFO (Last In, First Out – последний пришел, первый обслужился). Slice1–Slice6 – станции, не разделяемые на приоритеты. Узел RN

(radio node) соединяет все станции и работает как счетчик пакетов, которые проходят через него от одной к другой. Обработка пакетов идет по указанной дисциплине очереди. Далее проверяется качество обслуживания – потеря пакетов и задержки в передаче данных. Модель содержит один класс Main (так же, как показано на рисунке 3).

Все типы данных также передаются в соответствии с выбранными параметрами. Для каждого блока установлена интенсивность прибытия, а также задано количество агентов, прибывающих в секунду, задается нагрузка на базовую станцию, количество поступающих пакетов от абонентов, приоритет заявок, количество потерянных заявок и т.д.

Результаты исследований

Проведем моделирование сети 5G с различными вариантами выбора дисциплин очереди, с учетом решения проблем, указанных в [10; 11].

В таблице 1 приведены результаты исходных данных и полученные при моделировании для приоритетной очереди PR. В таблице 2 – для FIFO.

В данном случае расчет происходит за 1 минуту моделирования модели. Время обслуживания будет рассчитываться как:

$$T_0 = \frac{\rho}{N},$$

где T_0 – время обслуживания пакетов, ρ – нагрузка на базовую станцию (%), N – число отправленных пакетов.

Таблица 1. Результаты моделирования для приоритетной очереди

Характеристики	Станции 5G		
	Slice1	Slice2	Slice3
Исходные данные нагрузки, %	0,7	0,5	0,4
Приоритет PR (при наличии)	1	4	10
Исходные данные максимального граничного значения задержки, мс	1	6	15
Количество отправленных пакетов, шт.	898	730	660
Количество потерянных пакетов, шт.	1	56	78

Таблица 2. Результаты моделирования для FIFO

Характеристики	Станции 5G					
	Slice1	Slice2	Slice3	Slice4	Slice5	Slice6
Исходные данные нагрузки, %	0,5	0,55	0,65	0,7	0,6	0,45
Приоритет PR (при наличии)	0	0	0	0	0	0
Исходные данные максимального граничного значения задержки, мс	15	5	3	1	4	10
Количество отправленных пакетов, шт.	420	530	334	530	550	289
Количество потерянных пакетов, шт.	14	12	0	1	5	55

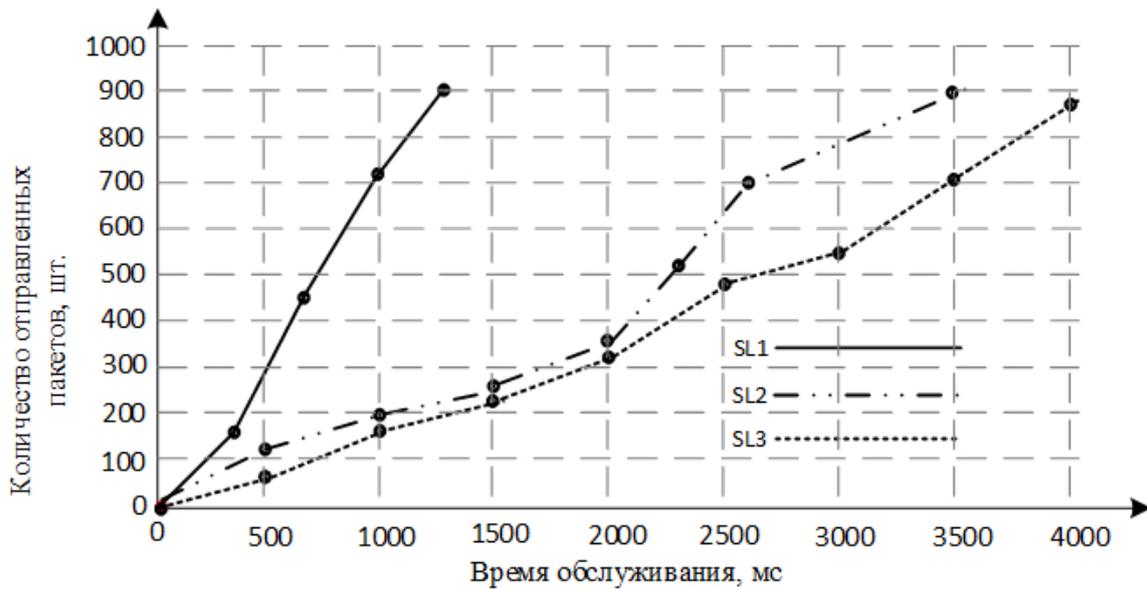


Рисунок 4. Зависимость времени обслуживания от количества отправленных пакетов в 5G с учетом приоритетов

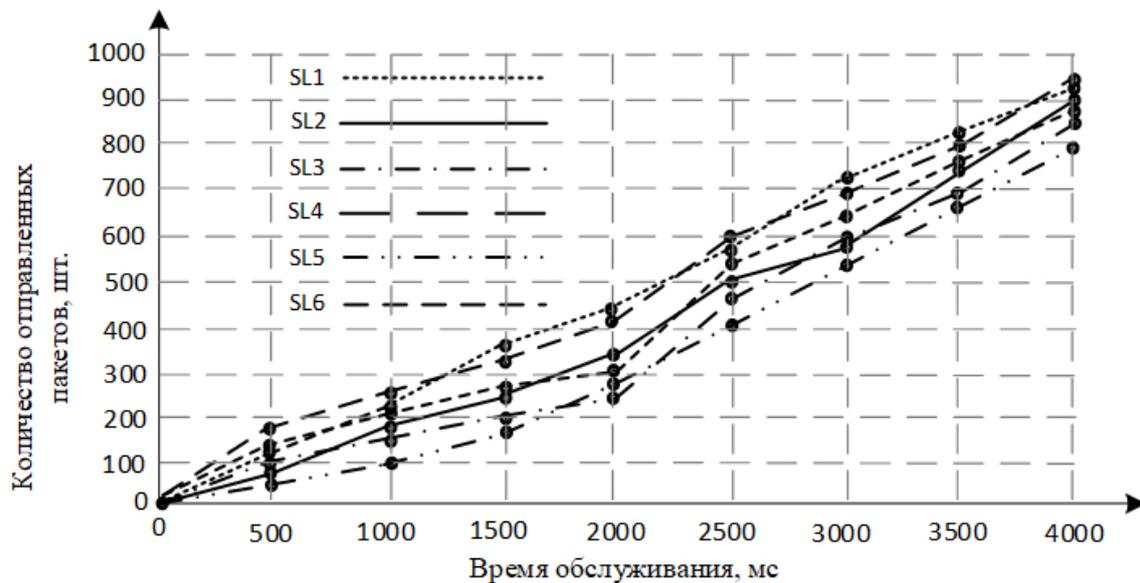


Рисунок 5. Зависимость времени обслуживания от количества отправленных пакетов в 5G без учета приоритетов

Получим графики зависимости времени обслуживания от количества отправленных пакетов в 5G с учетом приоритетов и без учета приоритетов, а также сделаем вывод о количестве потерянных пакетов (рисунок 4, рисунок 5).

Заключение

В результате исследования можно отметить:

1. По мере увеличения объема данных, обрабатываемых базовой станцией, время обработки пакетов растет.
2. Повышение приоритетности станции способствует сокращению времени обработки пакетов.

3. В целом, наиболее оптимальной конфигурацией является станция с низким приоритетом, низкой нагрузкой и средним количеством поступающих пакетов, так как такая станция обеспечивает среднее время обработки.

4. Исходя из различных дисциплин очереди, можно сделать вывод о возможности выбора наиболее оптимального решения для конкретного случая.

Таким образом, разработанная модель позволяет оценить влияние различных характеристик вышек 5G на качество обслуживания пакетов данных в сети. Это может помочь операторам связи оптимизировать работу своих сетей и обеспечить более эффективное использование ресурсов.

Литература

1. Оссейран А. Технологии мобильной связи 5G: анализ и перспективы // Первая миля. 2013. Т. 38, № 5. С. 16–21.
2. Модели и методы анализа и расчета показателей эффективности беспроводных гетерогенных сетей: монография / Ю.В. Гайдамака [и др.]. Москва: ФИЦ ИУ РАН, 2018. 71 с.
3. Никишин К.И. Исследование и моделирование 5G сети и характеристик передачи в среде AnyLogic // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2023. Т. 16, № 3. С. 15–24.
4. Кисельников А.Е., Усс М.О., Шидловский Д.Ю. Разработка систем связи стандарта 5G с применением инструментария 5G TOOLBOX программного пакета MATLAB // Центр инженерных технологий и моделирования «Экспонента», 2023. 10 с. URL: <https://hub.exponenta.ru/post/razrabotka-sistem-svyazi-standarta-5g-s-primeneniem-instrumentariya-5g-toolbox-programmnogo-paketa-matlab126> (дата обращения: 20.10.2023).
5. Xiaolong J., Geyong M. Modelling and analysis of priority queueing systems with multi-class self-similar network traffic: a novel and efficient queue-decomposition approach // IEEE Transactions on Communications. 2007. Vol. 57. P. 1444–1452.
6. Фокин Г.А. Модель технологии сетевого позиционирования метровой точности 5G NR. Часть 1. Конфигурация сигналов PRS // Труды учебных заведений связи. 2022. Т. 8, № 2. С. 48–63.
7. Никишин К.И. Моделирование беспроводной сенсорной сети с использованием OMNET++ // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2021. № 78. С. 46–54.
8. Боев В.Д. Об адекватности систем имитационного моделирования GPSS World и Any Logic. Часть 1 // Прикладная информатика. 2010. № 6 (30). С. 69–82.
9. Боев В.Д. Об адекватности систем имитационного моделирования GPSS World и AnyLogic. Часть 2 // Прикладная информатика. 2011. № 4 (34). С. 30–40.
10. Глушак Е.В., Лысиков А.А. Проблемы моделирования детерминированной базовой сети 5G // Актуальные проблемы информатики, радиотехники и связи: материалы XXX Российской научно-технической конференции. Самара, 2023. С. 30–31.
11. Глушак Е.В., Лысиков А.А. Проблемы моделирования детерминированной сети радиодоступа 5G // Актуальные проблемы информатики, радиотехники и связи: материалы XXX Российской научно-технической конференции. Самара, 2023. С. 31–32.

Получено 08.11.2023

Глушак Елена Владимировна, 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. +7 917 118-65-66. E-mail: evglushak@yandex.ru

5G NETWORK MODEL DEVELOPMENT IN ANYLOGIC ENVIRONMENT

Glushak E.V.

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

This article describes the analysis of programs for modeling 5G networks. In the selected AnyLogic program, a 5G network model with several base stations that have different characteristics was created. Studies of this model have been made taking into account various disciplines of the queue, the load on each station has been calculated at different priorities. It is proved that this model can be used to study and evaluate the of data transmission efficiency in 5G networks, as well as to analyze the impact of the characteristics of additional parameters (latency, load and priorities) on the quality of data processing. The studies confirmed that the developed 5G network model can help telecom operators optimize performance of their networks and ensure more efficient use of allocated resources.

Keywords: *5G networks, latency, packet loss, data transmission, base stations, AnyLogic program, service time, queue, network load*

DOI: 10.18469/ikt.2023.21.2.02

Glushak Elena Vladimirovna, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 23, L. Tolstoy Street, Samara, 443010, Russian Federation; Associate Professor of Networks and Communication Systems Department, PhD in Technical Science. Tel. +7 917 118-65-66. E-mail: evglushak@yandex.ru

References

1. Osseiran A. 5G radio access: research and vision. *Pervaya milya*, 2013, vol. 38, no. 5, pp. 16–21. (In Russ.)
2. Gaydamaka Yu.V. et al. *Models and methods of analysis and calculation of performance indicators of wireless heterogeneous networks: monograph*. Moscow: FITZ IU RAN, 2018, 71 p. (In Russ.)
3. Nikishin K.I. Research and simulation of a 5g network and transmission characteristics in anylogic. *Izvestiya SPbGETU «LETI»*, 2023, vol. 16, no. 3. pp. 15–24. (In Russ.)
4. Kiselnikov A.E., Uss M.O., Shidlovsky D.Y. *Development of communication systems of the 5G standard using the 5G TOOLBOX of the MATLAB software package*. Center for Engineering Technologies and Modeling «Exponent», 2023, 10 p. URL: <https://hub.exponenta.ru/post/razrabotka-sistem-svyazi-standarta-5g-s-primeneniem-instrumentariya-5g-toolbox-programmno-go-paketa-matlab126> (accessed: 20.10.2023). (In Russ.)
5. Xiaolong J., Geyong M. Modelling and analysis of priority queueing systems with multi-class self-similar network traffic: a novel and efficient queue-decomposition approach. *IEEE Transactions on Communications*, 2007, vol. 57, pp. 1444–1452.
6. Fokin G.A. Simulation model of 5G NR network positioning technology with meter accuracy. Part 1. PRS signals configuration. *Trudy uchebnykh zavedeniy svyazy*, 2022, vol. 8, no. 2, pp. 48–63. (In Russ.)
7. Nikishin K.I. Modeling of wireless sensor network using. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*, 2021, no. 78, pp. 46–54. (In Russ.)
8. Boev V. D. About adequacy of systems of imitating modelling GPSS world and Anylogic. *Prikladnaya informatika*, 2010, no. 6 (30), pp. 69–82. (In Russ.)
9. Boev V. D. On the adequacy of GPSS and Anylogic simulation system. *Prikladnaya informatika*, 2011, no. 4 (34), pp. 30–40. (In Russ.)
10. Glushak E.V., Lysikov A.A. Problems of modeling a deterministic 5G base network. *Aktual'nye problemy informatiki, radiotekhniki i svyazi: materialy XXX Rossijskoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii*, Samara, 2023, pp. 30–31. (In Russ.)
11. Glushak E.V., Lysikov A.A. Problems of modeling a deterministic 5G radio access network. *Aktual'nye problemy informatiki, radiotekhniki i svyazi: materialy XXX Rossijskoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii*. Samara, 2023, pp. 31–32. (In Russ.)

Received 08.11.2023

ЛИНИИ СВЯЗИ И ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

УДК 621.315.2

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕДАЧИ И ВЗАИМНОГО ВЛИЯНИЯ СИГНАЛЬНО-БЛОКИРОВОЧНЫХ КАБЕЛЕЙ С ТОКОПРОВОДЯЩИМИ ЖИЛАМИ ПОВЫШЕННОЙ ГИБКОСТИ

Попов В.Б.

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ
E-mail: inkat@inbox.ru

В последние годы интенсивное развитие пассажирского скоростного и грузового тяжеловесного движения определяет повышенные требования к организации и обеспечению перевозок, разработке и внедрению новых, пре-

жде всего, инфокоммуникационных технических средств и технологий железнодорожной инфраструктуры путевого комплекса. «Российские железные дороги» реализуют целый ряд значимых инфраструктурных проектов, несколько из которых получили статус федеральных. Одним из основных направлений развития сети железных дорог является их широкая электрификация, разработка и внедрение инновационных инфокоммуникационных технических средств и технологий железнодорожной инфраструктуры путевого комплекса. В процессе функционирования электрифицированных железных дорог возникают электромагнитные поля высокой мощности, что является серьезной проблемой с точки зрения электромагнитной совместимости оборудования. Поэтому предъявляются высокие требования к качеству кабелей систем сигнализации, централизации и блокировки железных дорог. В настоящей статье проводится исследование параметров передачи и обоюдного влияния сигнально-блокировочных кабелей и токопроводящих жил повышенной гибкости.

Ключевые слова: *сигнально-блокировочный кабель, низкочастотные параметры, высокочастотные параметры*

Общие положения

ОАО «РЖД» реализует целый ряд значимых инфраструктурных проектов. Несколько из них получили статус федеральных. Одним из основных направлений развития сети железных дорог является их широкая электрификация, разработка и внедрение инновационных инфокоммуникационных технических средств и технологий железнодорожной инфраструктуры путевого комплекса.

На электрифицированных железных дорогах серьезной проблемой являются электромагнитные поля высокой мощности, возникающие в процессе их функционирования. С целью снижения степени внешнего электромагнитного воздействия на кабели в их конструкции предусмотрены алюминиевые оболочки и стальные броневые покровы.

По цепям сигнально-блокировочных кабелей передаются сигналы систем сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ) [1]. Так, как российские железные дороги являются важным стратегическим объектом государства – к железнодорожным кабелям предъявляются жесткие требования, особенно к стабильности их эксплуатационных параметров в условиях воздействия негативных факторов.

Чаще всего кабели систем СЦБ имеют полиэтиленовую изоляцию и алюминиевую оболочку. На АО «Самарская кабельная компания» (АО «СКК») изготавливаются конструкции кабелей систем СЦБ со сплошной алюминиевой оболочкой и стальной броней из спирально наложенных лент [2–5], обеспечивающие защиту от воздействия внешних электромагнитных полей, а также механических и климатических условий.

В регламентирующем документе [6] установлены нормативные значения коэффициента затухания α и переходного затухания на ближнем конце A_0 . Сигнально-блокировочные кабели выпускаются как с однопроволочными, так и с многопроволочными токопроводящими жилами повышенной гибкости. Кабели с многопроволоч-

ными жилами применяются в тех местах, где в соответствии с монтажными и эксплуатационными условиями к токопроводящим жилам предъявляются требования повышенной гибкости. В источниках информации практически отсутствуют сведения об указанных параметрах кабелей систем СЦБ, особенно применительно к кабелям с многопроволочными токопроводящими жилами.

Технология производства сигнально-блокировочных кабелей в АО «Самарская кабельная компания»

На предприятии АО «СКК», которое в этом году отметило свое 71-летие, внедрена и успешно действует система менеджмента качества (СМК).

Предприятие АО «СКК» является одним из лидеров российской кабельной промышленности и специализируется на разработке и серийном выпуске телекоммуникационных, сигнально-блокировочных и контрольных кабелей, волоконно-оптических кабелей, автомобильных проводов, силовых кабелей и проводов для электроэнергетики. Осваивается выпуск новых видов кабельно-проводниковой продукции, номенклатура выпускаемой предприятием продукции постоянно расширяется. На предприятии реализуются новые бизнес-планы, внедряются новейшие технологии. Предприятие успешно вышло на мировой рынок кабельно-проводниковой продукции. Теперь перед компанией стоит задача прочно закрепиться на нем.

Благодаря функционированию СМК на предприятии АО «СКК» организовано производство высококачественной кабельно-проводниковой продукции, отвечающей запросам потребителей и соответствующей нормам и требованиям законодательных документов. На предприятии регулярно проводятся аттестации СМК. По результатам аттестаций выдаются сертификаты соответствия стандартам ISO 9001, ISO 14001 и ГОСТ РВ 0015-002.

Процесс производства сигнально-блокировочных кабелей имеет ряд очень важных тех-

нологических особенностей. Для изготовления кабеля высокой однородности особенно важной технологической операцией является операция наложения изоляции на токопроводящую жилу. Изоляция на токопроводящую жилу накладывается на поточной экструзионной линии с системой автоматического регулирования. В процессе наложения изоляции в режиме online выполняются измерения ряда параметров. Измеряются следующие параметры: погонная емкость, диаметр и эксцентриситет жилы, а также электрическая прочность изоляции. По результатам измерения указанных параметров системой автоматического регулирования поддерживаются нормативные значения величин емкости, диаметра, толщины и концентричности изоляции токопроводящей жилы [7, 8]. Толщина изоляции имеет допуск $\pm 1\%$ (0,003 мм), номинальная емкость – менее 2 пФ, концентричность изоляции – более 0,95. Скрутка кабельных пар выполняется на крутильных машинах с подобранными разными значениями шагов скрутки (не превышающими 100 мм). Весь этот комплекс технологических мероприятий направлен на обеспечение высоких и стабильных параметров передачи и взаимного влияния сигнально-блокировочных кабелей.

Результаты измерений параметров передачи и взаимного влияния

Исследуемый сигнально-блокировочный кабель марки СБМВБАБпШп 19х2х1,0 имеет конструкцию с алюминиевой оболочкой и многопроволочными токопроводящими жилами сечением 1,0 мм². Многопроволочные токопроводящие жилы этого кабеля представляют собой стренгу. Стренга токопроводящих жил скручивается из 7 однородных по структуре и геометрии медных проволок диаметром 0,427 мм. Электрические параметры исследуемого кабеля определялись в заводских условиях на строительных длинах 112 м и 300 м с использованием измерительного комплекса «ПИКА ИКС» и измерительного прибора PSM-39.

Низкочастотные параметры кабеля. К низкочастотным параметрам передачи относятся: сопротивление жил постоянному току (R), норма не более 17,8 – 19,9 Ом/км; омическая асимметрия жил (ΔR) – не более 0,8 Ом; рабочая емкость (C) – не более 70 нФ/км.

Низкочастотные параметры кабеля очень сильно зависят от геометрической и структурной однородности медных токопроводящих жил и изоляции.

При статистической обработке результатов измерений низкочастотных параметров кабеля дела-

лось предположение что они имеют нормальный закон распределения, а также характеризуются статистическими средними значениями (R_{cp} , ΔR , C) и среднеквадратическими отклонениями от средних значений (σ) [9]. Результаты статистической обработки низкочастотных параметров приведены в таблице 1.

Таблица 1 Низкочастотные параметры сигнально-блокировочного кабеля марки СБМВБАБпШп 19х2х1,0

R , Ом/км		ΔR , %		C , нФ/км	
R_{cp}	σ	ΔR_{cp}	σ	C_{cp}	σ
17,75	0,34	0,03	0,23	48,56	0,92

Анализ результатов измерения показывает, что электрическое сопротивление медных токопроводящих жил имеет минимальное отклонение от статистического среднего значения и очень стабильно; омическая асимметрия значительно меньше допустимых 0,8 Ом; рабочая емкость также меньше максимально допустимого значения 70 нФ/ км. Следует отметить, что в сигнально-блокировочных кабелях требования к омической асимметрии по сравнению с другими симметричными кабелями более высокие. При этом обеспечить низкое значение ΔR удается благодаря применению в многопроволочных проводниках для скрутки в стренгу высокооднородных медных проволок диаметром 0,427 мм. Все это в конечном итоге положительно сказывается на высокочастотных параметрах передачи и взаимного влияния кабеля и оказывает положительное влияние на эффективность применения кабелей, благодаря повышению их потребительских свойств.

Высокочастотные параметры кабеля. К основным высокочастотным параметрам сигнально-блокировочных кабелей относятся: коэффициент затухания, α , дБ/км; переходное затухание на ближнем конце, A_0 , дБ и защищенность на дальнем конце, A_z , дБ. Указанные параметры требуется учитывать при организации технологической связи по сигнально-блокировочным кабелям. В ГОСТ 34679-2020 приведены нормы на коэффициент затухания в диапазоне частот до 39 кГц, а переходного затухания на ближнем конце до 160 кГц. В этой статье указанные параметры исследуются в более широком диапазоне частот до 250 кГц. Также исследован такой важный параметр, как защищенность на дальнем конце. В таблице 2 и приведены усредненные значения коэффициента затухания кабеля марки СБМВБАБпШп 19х2х1,0. На рисунке 1 приведен график частотной характеристики коэффициента затуха-

ния α (усредненные значения параметра) исследуемого сигнально-блокировочного кабеля.

Измерения выполнялись измерительным прибором PSM-39.

Анализ результатов измерения коэффициента затухания α , приведенных в таблице 2 и на рисунке 1, показывает, что затухание в кабеле возрастает пропорционально квадратному корню из частоты. Это свидетельствует о том, что в кабеле определяющими характеристиками являются потери в металле. При этом нормы величины коэффициента затухания α цепей кабеля в соответствии с ГОСТ 34679-2020 выполняются.

В таблице 3 приведены усредненные значения параметров взаимного влияния кабеля. На рисунке 2 приведены графики частотных характеристик этих параметров. Измерения выполнялись измерительным комплексом «ПИКА ИКС».

Анализируя результаты, можно сказать, что значения переходных затуханий соответствуют требованиям ГОСТ 34679-2020. Скорость снижения значений переходного затухания на ближнем конце A_0 и защищенности на дальнем конце $A_з$ при увеличении частоты не более 6 дБ на октаву. Таким образом, подтверждаются теоретические

положения о том, что в данном случае наведенная помеха формируется в основном за счет непосредственного электромагнитного влияния, а именно его нерегулярной составляющей [10]. Это свидетельствует о высокой геометрической и структурной однородности сигнально-блокировочного кабеля марки СБМВБАБпШп 19х2х1,0.

Заключение

Подводя итоги проведенного исследования параметров передачи и взаимного влияния сигнально-блокировочного кабеля марки СБМВБАБпШп 19х2х1,0 в алюминиевой оболочке с многопроволочными токопроводящими жилами повышенной гибкости, можно сделать вывод, что по низкочастотным параметрам кабель соответствует нормам [6] в исследуемом диапазоне частот до 250 кГц. Достаточно высокие значения параметров передачи и взаимных влияний дают возможность рекомендовать сигнально-блокировочные кабели производства предприятия АО «СКК» для применения на сетях железных дорог при организации высокочастотной технологической связи в диапазоне частот до 250 кГц.

Таблица 2. Усредненные значения коэффициента затухания сигнально-блокировочного кабеля марки СБМВБАБпШп 19х2х1,0

Частота, кГц	0,8	10	15	20	40	60	100	160	250
α , дБ/км	0,72	1,13	1,23	1,37	1,94	2,55	3,23	3,74	4,98

Таблица 3. Усредненные значения переходного затухания на ближнем конце и защищенности на дальнем конце сигнально-блокировочного кабеля СБМВБАБпШп 19х2х1,0

Частота, кГц	0,8	10	15	20	40	60	100	160	250
A_0 , дБ	106	104	101	99	94	90	86	82	76
$A_з$, дБ	105	103	100	98	93	91	84	80	75

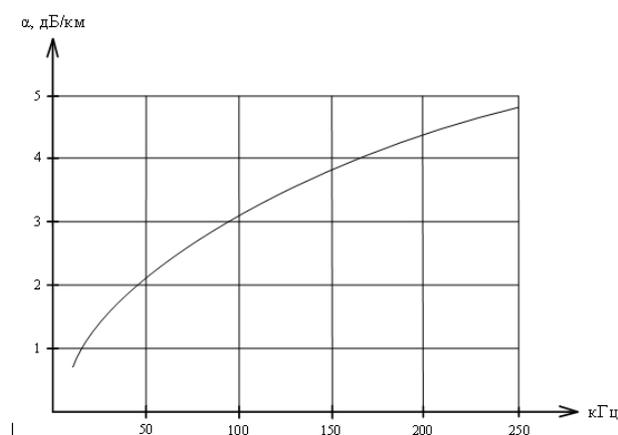


Рисунок 1. Частотная характеристика коэффициента затухания α (усредненные значения) сигнально-блокировочного кабеля марки СБМВБАБпШп 19х2х1,0

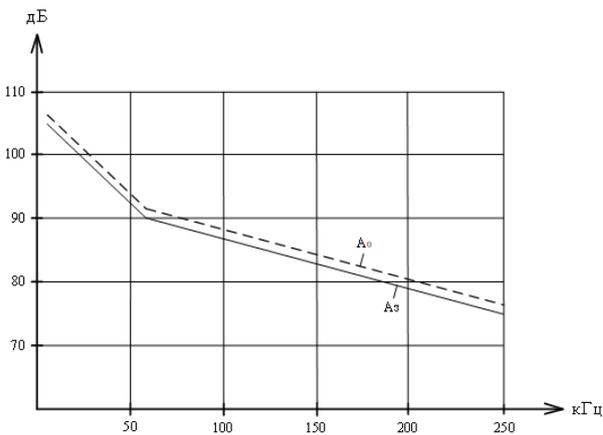


Рисунок 2. Частотные характеристики переходного затухания на ближнем конце A_0 и защищенности на дальнем конце $A_з$ (усредненные значения) кабеля СБМВБАБпШп 19х2х1,0

Литература

1. Кабели и провода. Основы кабельной техники / А.И. Балашов [и др.]; под ред. И.Б. Пешкова. М.: Энергоатомиздат, 2009. 467 с.
2. Андреев В.А., Попов Б.В. Экранирующие характеристики сигнально-блокировочных кабелей // Автоматика, связь, информатика. 2015. № 4. С. 14–16.
3. Направляющие системы электросвязи: учебник для вузов / В.А. Андреев [и др.]. М.: Горячая линия-Телеком, 2018. 396 с.
4. Исследование стойкости сигнально-блокировочных кабелей / Н.И. Алехин [и др.] // Автоматика, связь, информатика. 2018. №7. С. 23–25.
5. Гроднев И.И., Сергейчук К.Я. Экранирование аппаратуры и кабелей связи. М.: Связьиздат, 1960. 316 с.
6. ГОСТ 34679-2020 «Кабели для сигнализации и блокировки. Общие технические условия». М.: Стандартинформ, 2020. 38 с.
7. Качество LAN-кабелей – основа надежной работы СКС и сетей ШПД / В.А. Андреев [и др.] // Первая миля. 2020. № 1. С. 24–27.
8. Бабицкий О.Ш., Лехтман Д.Я. Технология скрутки кабелей. М.: Энергия, 1978. 133 с.
9. Шварцман В.О. Взаимные влияния в кабелях связи. М.: Связь, 1966. 416 с.
10. Андреев В.А. Теория электромагнитных влияний между цепями связи. М.: Радио и связь, 1999. 320 с.

Получено 06.09.2023

Попов Виктор Борисович, к.т.н., профессор кафедры линий связи и измерений в технике связи Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики. 443090, Российская Федерация, г. Самара, Московское шоссе, д. 77. Тел. +7 846 228-00-66. E-mail: inkat@inbox.ru

STUDY OF TRANSMISSION PARAMETERS AND MUTUAL INFLUENCE OF SIGNAL-BLOCKING CABLES WITH CURRENT-CONDUCTIVE CORES WITH INCREASED FLEXIBILITY

Popov V.B.

*Povolzhskiy State University of telecommunications and Informatics, Samara, Russian Federation
E-mail: inkat@inbox.ru*

In recent years, the intensive development of passenger high-speed and freight heavy traffic created increased demands on the organization and provision of transportation, the development and implementation of new, primarily infocommunication technical means and technologies of the track complex. Russian Railways is implementing a number of significant infrastructure projects, several of which have obtained federal status. One of the main directions of of the railway network development is its widespread electrification, development and implementation of innovative infocommunication technical means and technologies for the railway infrastructure of the track complex. During the operation of electrified railways, generated high-power electromagnetic fields posing a serious problem related to electromagnetic compatibility of equipment. Therefore, requirements are placed on the quality of cables of signaling, centralization and blocking systems of railways are rather high. The article observes the transmission parameters and mutual influence of signal-blocking cables and current-carrying cores with high-flexibility.

Keywords: *signal-blocking cable, low-frequency characteristics, high-frequency characteristics*

DOI: 10.18469/ikt.2023.21.2.03

Popov Victor Borisovich, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 77, Moskovskoe shosse, Samara, 443090, Russian Federation; Professor of Communication and Measurement in Communications Technology Department, PhD in Technical Science. Tel. +7 846 228-00-66. E-mail: inkat@inbox.ru

References

1. Balashov A.I. et al. *Cables and wires. Fundamentals of cable technology*. Ed. by I.B. Peshkov. Moscow: Energoatomizdat, 2009, 467 p. (In Russ.)
2. Andreev V.A., Popov B.V. Shielding characteristics of signal-blocking cables. *Avtomatika*,

- svyaz', informatika*, 2015, no. 4, pp. 14–16. (In Russ.)
3. Andreev V.A. et al. *Directing telecommunication systems: Textbook for Universities*. Moscow: Hotline-Telecom, 2018, 396 p. (In Russ.)
 4. Alekhin N.I. et al. Study of the durability of signal-blocking cables. *Automation, communications, computer science*, 2018, no. 7, pp. 23–25. (In Russ.)
 5. Grodnev I.I., Sergeychuk K.Ya. *Shielding of equipment and communication cables*. Moscow: Svyazizdat, 1960, 316 p. (In Russ.)
 6. GOST 34679 -2020 Cables for signaling and blocking. General technical conditions. Moscow: Standartinform, 2020. 38 p. (In Russ.)
 7. Andreev V. et al. Quality of lan cables – the basis for reliable work of scs and broadband. *Pervaya milya*, 2020, no.1, pp. 24–27. (In Russ.)
 8. Babitsky O.Sh., Lekhtman D.Ya. *Technology twisting cables*. Moscow: Energiya, 1978, 133 p. (In Russ.)
 9. Shvartsman V.O. *Mutual influences in communication cables*. Moscow: Svyaz', 1996, 416 p. (In Russ.)
 10. Andreev V.A. *The theory of electromagnetic influences between communication circuits*. Moscow: Radio i svyaz', 1999, 320 p. (In Russ.)

Received 06.09.2023

РАДИОПЕРЕДАЮЩИЕ И РАДИОПРИЕМНЫЕ УСТРОЙСТВА, ТЕЛЕВИДЕНИЕ

УДК 629.78

ПЕРЕОРИЕНТАЦИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ С ПОМОЩЬЮ РОТОРОВ

Алексеев А.В., Голушкова А.О.

*Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, РФ
Email: alekseev.av@ssau.ru*

В статье описывается способ переориентации спутника-гиростата дистанционного зондирования Земли с помощью двигателя-маховика, при нахождении в одной вертикальной плоскости с объектом наблюдения. В ходе исследования выведена геометрическая зависимость угла нутации от времени, построены дифференциальные уравнения движения космического аппарата относительно центра масс и получены их решения. Полученные уравнения позволяют определять параметры движения (координаты и скорости) в зависимости от инерционно-массовых характеристик системы, начальных условий и времени, а также управлять воздействием данных параметров на систему. В статье представлены результаты проведенных исследований, которые показывают работоспособность разработанной математической модели. Благодаря разработанной модели, можно с высокой точностью определить необходимые управляющие воздействия для нацеливания спутника-гиростата на объект наблюдения.

Ключевые слова: *гиростат, роторы, математическая модель, уравнения движения, дистанционное зондирование, углы Эйлера, угловая скорость, кинетический момент*

Введение

С каждым днем появляется все больше потребностей в дистанционном зондировании Земли (ДЗЗ). Дистанционное зондирование – это процесс наблюдения и изучения нашей планеты, при котором используются специальные инструменты и технологии, используемые на спутниках или самолетах. Существуют и другие задачи, в которых требуется нацеливание космического аппарата (КА) на определенный объект.

Чаще всего при переориентации КА для на-

целивания антенны или камеры используются двигатели малой тяги, которые подразделяются на несколько категорий: на сжатом газе, на монотопливе, на двухкомпонентном топливе; специальные установки и двигатели на закиси азота, аммиаке, газообразном водороде и кислороде; электроракетные системы на базе импульсных плазменных, ионных или стационарных плазменных двигателей [1].

Все вышеперечисленные инструменты для переориентации КА подразумевают расход рабочего

тела, запас которого на борту КА ограничен. Предлагается использовать двигатели-маховики на основе управляемого моментного бесконтактного двигателя постоянного тока [2]. Данный способ является более эффективным из-за отсутствия необходимости в расходуемом рабочем теле, и, как следствие, уменьшения рабочей массы КА. Подобные КА называют спутниками-гиростатами.

Исследованию движения гиростатов посвящено достаточно много работ отечественных и зарубежных ученых, например, Румянцева В.В. [3; 4], Кошлякова В.Н. [5], Нейштадта А.И. и Пивоварова М.Л. [6], Виттенбурга Й. [7], Асланова В.С. и Дорошина А.В. [8; 9] и многих других. В отмеченных работах, в основном, исследуется динамика и устойчивость движения гиростатов, но мало внимания уделяется определению законов движения и управляющих воздействий, обеспечивающих данные движения.

В настоящей работе предпринимается попытка решения конкретной прикладной задачи: определения закона ориентации КА ДЗЗ с частичной закруткой для наблюдения за объектом, а также управляющего внутреннего момента, обеспечивающего полученный закон.

Математическая модель

Предположим, что спутник-гиростат представляет собой динамически несимметричное несущее тело (тело 4) с тремя одинаковыми динамически симметричными роторами (тела 1, 2, 3), оси вращения которых совпадают с главными осями инерции всей системы (рисунок 1). На рисунке 1 роторы изображены схематично (вне несущего тела) для наглядности и удобства обозначения координатных осей и других параметров: на самом деле роторы находятся внутри КА.

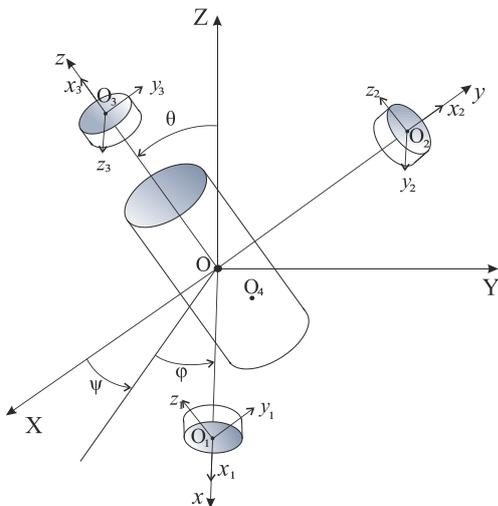


Рисунок 1. Схема спутника-гиростата и используемые системы координат

Динамические уравнения движения спутника-гиростата строятся на основании теоремы об изменении кинетического момента механической системы [3]:

$$\begin{aligned} A\dot{p} + (C - B)qr + I\dot{\sigma}_1 + I(q\sigma_3 - r\sigma_2) &= M_x; \\ B\dot{q} + (A - C)pr + I\dot{\sigma}_2 + I(r\sigma_1 - p\sigma_3) &= M_y; \\ C\dot{r} + (B - A)pq + I\dot{\sigma}_3 + I(p\sigma_2 - q\sigma_1) &= M_z. \end{aligned} \quad (1)$$

где $A = \sum_{i=1}^4 A_i$, $B = \sum_{i=1}^4 B_i$, $C = \sum_{i=1}^4 C_i$; A_i, B_i, C_i ($i = \overline{1,3}$) – главные моменты инерции роторов, вычисленные в своих связанных системах координат $Ox_i y_i z_i$ ($i = \overline{1,3}$), а моменты инерции тела-носителя в системе координат $Oxyz - A_4, B_4, C_4$; p, q, r – проекции угловой скорости несущего тела на оси системы координат $Oxyz$; $I = A_1 = B_2 = C_3$ – осевые моменты инерции роторов. Правые части уравнений (1) представляют собой проекции момента внешних сил.

Кинематические уравнения для углов Эйлера и углов относительного закручивания:

$$\begin{aligned} \dot{\varphi} &= r - \text{ctg}\theta(p \sin \varphi + q \cos \varphi); \\ \dot{\theta} &= p \cos \varphi - q \sin \varphi; \\ \dot{\psi} &= \frac{1}{\sin \theta}(p \sin \varphi + q \cos \varphi); \\ \dot{\alpha} &= \sigma_1; \dot{\beta} = \sigma_2; \dot{\gamma} = \sigma_3. \end{aligned} \quad (2)$$

где φ, θ, ψ – эйлеровы углы, которые характеризуют положение несущего тела относительно кениговой системы $OXYZ$; α, β, γ – углы относительного закручивания роторов; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – относительные угловые скорости роторов.

Уравнения относительного движения роторов:

$$\begin{aligned} A_1(\dot{p} + \dot{\sigma}_1) &= M_{1x} + M_\alpha; \\ B_2(\dot{q} + \dot{\sigma}_2) &= M_{2y} + M_\beta; \\ C_3(\dot{r} + \dot{\sigma}_3) &= M_{3z} + M_\gamma. \end{aligned} \quad (3)$$

где $M_\alpha, M_\beta, M_\gamma$ – моменты внутреннего взаимодействия тел вдоль оси вращения; M_{1x}, M_{2y}, M_{3z} – моменты внешних сил, действующие на роторы.

Компоненты векторов угловых скоростей роторов $\vec{\omega}_1(p_1, q_1, r_1)$, $\vec{\omega}_2(p_2, q_2, r_2)$, $\vec{\omega}_3(p_3, q_3, r_3)$, выраженные через компоненты угловой скорости несущего тела, имеют вид:

$$\begin{cases} p_1 = p + \sigma_1, \\ q_1 = q \cos \alpha + r \sin \alpha, \\ r_1 = r \cos \alpha - q \sin \alpha. \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} p_2 = p \cos \beta - r \sin \beta, \\ q_2 = q + \sigma_2, \\ r_2 = r \cos \beta + p \sin \beta. \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} p_3 = p \cos \gamma + q \sin \gamma, \\ q_3 = q \cos \gamma - p \sin \gamma, \\ r_3 = r + \sigma_3. \end{cases} \quad (6)$$

Таким образом, уравнения (1) – представляют собой замкнутую математическую модель движения спутника-гиростата относительно центра масс. Приведенные уравнения при добавлении начальных условий позволяют определить все параметры движения системы в зависимости от времени.

Постановка задачи и преобразование математической модели

На данном этапе рассматривается так называемая плоская задача, для которой принимается ряд основных допущений:

1. Спутник движется прямолинейно с постоянной скоростью центра масс v , находясь в одной вертикальной плоскости с наблюдаемым объектом, на высоте H , в начальный момент на расстоянии L (рисунок 2).

2. Для нацеливания спутника-гиростата используется только один маховик, ось вращения которого совпадает с осью Ox .

3. Значение угла θ в начальный момент принято равным 30° , что соответствует нацеливанию на объект наблюдения (остальные геометрические размеры соответствуют данному начальному углу).

4. Так как расстояние, на котором происходит съемка объекта, значительно меньше длины окружности земли ($\approx \frac{1}{46}$ длины экватора), то сферичностью земной поверхности пренебрегаем.

5. Внешние силы и моменты на систему не действуют.

С учетом перечисленных допущений, движение спутника-гиростата описывается следующими уравнениями, полученными из системы (1)–(6):

$$\begin{cases} A\dot{p} + I\dot{\sigma}_1 = 0; \\ \dot{\theta} = p; \\ I(\dot{p} + \dot{\sigma}_1) = M_\alpha; \\ \dot{\alpha} = \sigma_1. \end{cases} \quad (7)$$

Таким образом, ставится задача определения внутреннего управляющего момента M_α , который обеспечивает нацеливание КА ДЗЗ на объект наблюдения в течение некоторого интервала времени.

Определение управляющего момента

В течении всего времени t активного участка полета (съемки) угол нутации может быть определен по формуле (рисунок 2):

$$\theta = \operatorname{arccot} \frac{L - vt}{H}. \quad (8)$$

Определим необходимую угловую скорость КА согласно второму уравнению системы (7):

$$p = \dot{\theta} = \frac{Hv}{H^2 + (L - vt)^2}. \quad (9)$$

Найдем производную угловой скорости (9):

$$\dot{p} = \frac{2Hv^2(L - vt)}{(H^2 + (L - vt)^2)^2}. \quad (10)$$

Подставляя производную (10) в первое уравнение системы (7), выразим относительное угловое ускорение ротора:

$$\dot{\sigma}_1 = \frac{2Hv^2 A(L - vt)}{I(H^2 + (L - vt)^2)^2}. \quad (11)$$

Зная угловые ускорения (10) и (11), найдем из третьего уравнения системы (7) зависимость управляющего момента от времени:

$$M_\alpha = \frac{2Hv^2(A - I)(vt - L)}{(H^2 + (vt - L)^2)^2}. \quad (12)$$

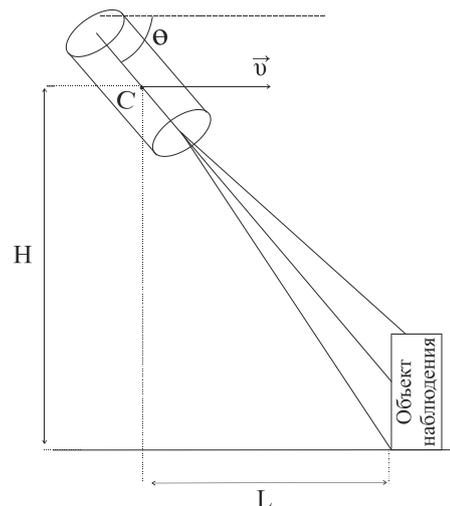


Рисунок 2. Схема движения спутника-гиростата

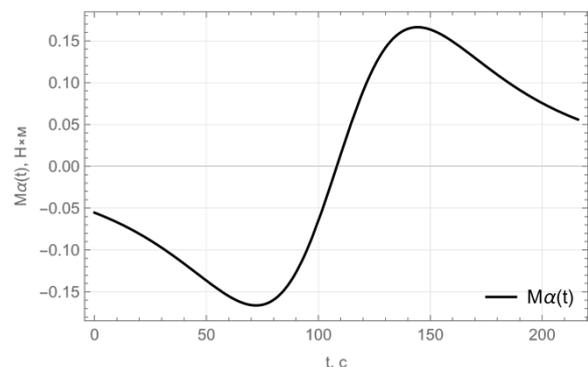


Рисунок 3. График зависимости управляющего момента от времени

На рисунке 3 показана зависимость управляющего момента M_α от времени.

Таблица 1 Основные технические характеристики двигателей-маховиков для систем ориентации космических аппаратов

Параметры	ДМ1-20	ДМ5-20	ДМ10-25	ДМ20-250	ДМБ
Диапазон изменения кинетического момента, Н	1,0	5,0	10,0	20,0	29,4
Управляющий момент $M_x, \dot{I} \cdot i$	0,02	0,05	0,025	0,25	0,35
Диапазон изменения частоты вращения n , об/мин.	65000	63500	66000	61470	61200
Число импульсов на оборот, N	36	36	36	56	960
Масса, кг	1,4	3,8	4	11,5	17,5
Максимальная потребляемая мощность, не более, Вт	15	31	31	70	100
Потребляемая мощность в установившемся режиме, не более, Вт	3	4	5	6	7

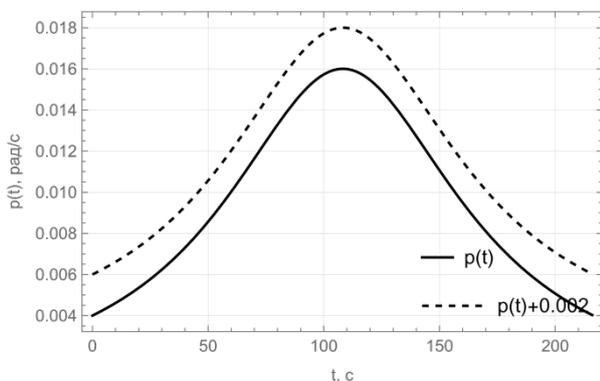
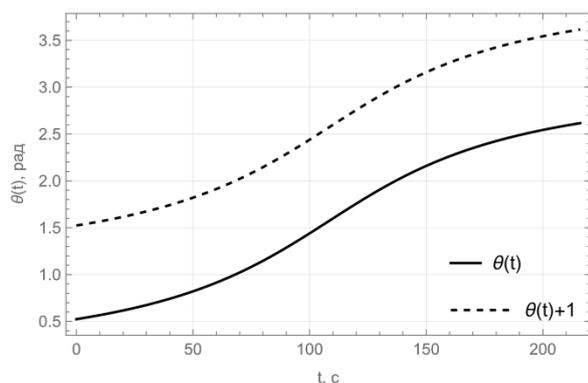
Рисунок 4. График зависимости проекции угловой скорости p от времени

Рисунок 5. График зависимости угла нутации от времени

Для проверки результатов, полученных выше, проведено численное интегрирование системы дифференциальных уравнений (7) при соответствующих исходных условиях и внутреннем моменте (12). На рисунках 4 и 5 представлены зависимости угловой скорости несущего тела p и угла нутации θ от времени. При этом на рисунках представлены результаты аналитического расче-

та по формулам (8) и (9) и численного интегрирования системы (7). Так как результаты полностью совпали, для наглядности численное решение несколько смещено вверх.

Выбор двигателя-маховика

Для обеспечения закона (12) изменения внутреннего управляющего момента, действующего на ротор, необходимо на КА установить двигатель с соответствующими параметрами. Основным параметром решаемой задачи является величина управляющего момента. Для выбранных параметров системы значение максимального управляющего момента лежит в диапазоне 0,15–0,20 Нм.

В таблице 1 представлены основные характеристики применяемых в настоящее время двигателей-маховиков для управления ориентацией КА, масса которых составляет менее 500 кг [10]. Двигатель-маховик представляет собой электрический двигатель, на валу которого установлен массивный маховик.

Таким образом, из представленных моделей двигателей для решения поставленной задачи подходит, например, модель ДМ20-250, так как его значения управляющего момента соизмеримы с теми, которые были получены в ходе вычисления.

Заключение

В качестве основных результатов работы следует отметить преобразование имеющейся математической модели под плоскую задачу, определение закона изменения угла нутации, обеспечивающего нацеленность КА на объект наблюдения, получение зависимости внутреннего управляющего момента от времени, оценку величины управляющего момента, которая по-

зволила выбрать требуемый двигатель-маховик. Кроме того, проведено численное моделирование движения для проверки адекватности аналитических зависимостей.

Результаты работы могут быть использованы при проектировании КА ДЗЗ, с частичной закруткой для переориентации (маховики), а также для расчетов и моделирования движения существующих спутников-гиростатов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (Проект № 19-19-00085).

Литература

1. Рыжков В.В., Сулинов А.В. Двигательные установки и ракетные двигатели малой тяги на различных физических принципах для систем управления малых и сверхмалых космических аппаратов // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2018. Т. 17, № 4. С. 115–128.
2. Характеристики двигателей-маховиков. URL: <https://www.vniiem.ru/ru/index.php?view=article&id=288:2010-02-17-21-42-21> (дата обращения: 02.11.2023).
3. Румянцев В.В. Об управлении ориентацией и о стабилизации спутника роторами // Вестник Московского университета. Серия 1: Математика, механика. 1970. № 2. С. 83–96.
4. Румянцев В.В. Об устойчивости вращения тяжелого гиростата на горизонтальной пло-

скости // Известия академии наук. Механика твердого тела. 1980. №4. С. 11–21.

5. Кошляков В.Н. Задачи динамики твердого тела и прикладной теории гироскопов. М.: Наука, 1985. С. 286.
6. Нейштадт А.И., Пивоваров М.Л. Переход через сепаратрису в динамике спутника с двойным вращением // Прикладная математика и механика. 2000. Т. 64, № 5. С. 741–746.
7. Виттенбург Й. Динамика систем твердых тел. М.: Мир, 1980. 292 с.
8. Асланов В.С., Дорошин А.В. О двух случаях движения неуравновешенного гиростата // Известия Академии наук. Механика твердого тела. 2006. № 4. С. 42–55.
9. Асланов В.С., Дорошин А.В. Стабилизация спускаемого аппарата частичной закруткой при осуществлении неуправляемого спуска в атмосфере // Космические исследования. 2002. Т. 40, № 2. С. 193–200.
10. Поляков М.В., Полякова А.В. Двигатель-маховик на базе механической системы «Электродвигатель-редуктор-маховик» для управления ориентацией малого космического аппарата // Студенческий научный форум: материалы VI международной студенческой научной конференции. URL: <https://scienceforum.ru/2014/article/2014001910> (дата обращения: 04.11.2023).

Получено 10.11.2023

Алексеев Алексей Владимирович, к.т.н., доцент кафедры теоретической механики Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева (Самарский университет). 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34. Тел. +7 927 696-09-30. E-mail: alekseev.av@ssau.ru

Голушкова Алена Олеговна, студент кафедры теоретической механики Самарского университета. 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34. Тел. +7 960 824-84-89. E-mail: alenagol15935745@gmail.com

REORIENTATION OF THE EARTH REMOTE SENSING SPACECRAFT USING ROTORS

Alekseev A.V., Golushkova A.O.

Samara National Research University, Samara, Russian Federation

E-mail: alekseev.av@ssau.ru

The article describes a method of reorienting of the Earth remote sensing gyrostatt satellite using a fly-wheel engine, while located in the same vertical plane with the observation object. In the course of the study, a geometric dependence of the nutation angle on time was derived, differential equations of the motion of the spacecraft relative to the center of mass were generated and solutions were obtained. These obtained equations allows to determine motion parameters (coordinates and speeds) depending on the inertial mass characteristics of the system, initial conditions and time, as well as control the effect of these parameters on the system. The article presents the results of conducted studies that show the performance of the developed mathematical model. Thanks to the developed model, it is possible to determine the necessary control actions to target the gyrostatt satellite to the observation object with high accuracy.

Keywords: gyrostat, rotors, mathematical model, equations of motion, remote sensing, Euler angles, angular velocity, kinetic momentum

DOI: 10.18469/ikt.2023.21.2.04

Alekseev Aleksey Vladimirovich, Samara National Research University, 34, Moskovskoye shosse, Samara, 443086, Russian Federation; Associate Professor of Theoretical Mechanics Department, PhD in Technical Science. Tel. +7 927 696-09-30. E-mail: alekseev.av@ssau.ru

Golushkova Alena Olegovna, Samara National Research University, 34, Moskovskoye shosse, Samara, 443086, Russian Federation; Student of Theoretical Mechanics Department. Tel. +7 960 824-84-89. E-mail: alenagol15935745@gmail.com

References

1. Ryzhkov V.V., Sulinov A.V. Propulsion systems and low-thrust rocket engines based on various physical principles for control systems of small and micro-spacecraft. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie*, 2018, vol. 17, no. 4, pp. 115–128. (In Russ.)
2. Characteristics of flywheel engines. URL: <https://www.vniiem.ru/ru/index.php?view=article&id=288:2010-02-17-21-42-21> (accessed: 02.11.2023). (In Russ.)
3. Rummyantsev V.V. On orientation control and stabilization of the satellite by rotors. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 1: Matematika, mekhanika*, 1970, no. 2, pp. 83–96. (In Russ.)
4. Rummyantsev V.V. On the stability of the rotation of heavy gyrostat on the horizontal plane. *Izvestiya akademii nauk. Mekhanika tverdogo tela*, 1980, no. 4, pp. 11–21. (In Russ.)
5. Koshlyakov V.N. *Problems of solid state dynamics and applied gyroscope theory*. Moscow: Nauka, 1985, 286 p. (In Russ.)
6. Neustadt A.I., Pivovarov M.L. Transition through separatrix in dual-spin satellite dynamics. *Prikladnaya matematika i mekhanika*, 2000, vol. 64, no. 5, pp. 741–746. (In Russ.)
7. Wittenburg J. *Dynamics of solid body systems*. Moscow: Mir, 1980, 292 p. (In Russ.)
8. Aslanov V.S., Doroshin A.V. On two cases of movement of an unbalanced gyrostat. *Izvestiya Akademii nauk. Mekhanika tverdogo tela*, 2006, no. 4, pp. 42–55. (In Russ.)
9. Aslanov V.S., Doroshin A.V. Stabilization of a reentry vehicle by a partial spin-up during uncontrolled descent. *Kosmicheskie issledovaniya*, 2002, vol. 40, no. 2, pp. 193–200. (In Russ.)
10. Polyakov M.V., Polyakova A.V. Flywheel engine based on the mechanical system «Electric gearbox-flywheel» for controlling the orientation of a small spacecraft. *Studencheskiy nauchnyy forum: materialy VI mezhdunarodnoy studencheskoj nauchnoj konferencii*. URL: <https://scienceforum.ru/2014/article/2014001910> (accessed: 04.11.2023).

Received 10.11.2023

УДК 629.7

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ БЕЗОПАСНОГО СБЛИЖЕНИЯ СПУТНИКА-ИНСПЕКТОРА С КОСМИЧЕСКИМ АППАРАТОМ НА ОРБИТЕ ЗЕМЛИ

Алексеев А.В., Ефременкова В.В.

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П.Королева, Самара, РФ
E-mail: alekseev.av@ssau.ru

Статья посвящена исследованию движения спутника-инспектора в окрестности наблюдаемого космического аппарата. Спутник-инспектор предназначен для наблюдения за космическим аппаратом, проведения своевременного технического обслуживания с целью устранения неисправностей для его дальнейшего функционирования, дозаправки, буксировки и т.д. Одним из важнейших этапов работы спутника является сближение с космическим аппаратом, которое

где $\mu = GM$ – стандартный гравитационный параметр, G – гравитационная постоянная, M – масса Земли.

Из двух формул ускорения центра масс КА следуют выражения для его угловой и линейной скорости, а также периода обращения:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{\mu}{R_0^3}}, \quad V_0 = \omega_0 R_0 = \sqrt{\frac{\mu}{R_0}},$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi \sqrt{\frac{R_0^3}{\mu}}.$$

Запишем для спутника-инспектора основное уравнение динамики относительного движения [9]:

$$m\ddot{\vec{\rho}} = \vec{F} + \vec{\Phi}_e + \vec{\Phi}_c, \quad (1)$$

где \vec{F} – гравитационная сила, $\vec{\Phi}_e$ – переносная сила инерции, $\vec{\Phi}_c$ – сила инерции Кориолиса, которые определяются по формулам:

$$\vec{F} = G \frac{Mm}{|\vec{r}|^2} \cdot \left(-\frac{\vec{r}}{|\vec{r}|} \right) = -\frac{\mu}{|\vec{r}|^3} m\vec{r} = -\omega_0^2 \left(\frac{R_0}{r} \right)^3 m\vec{r},$$

$$\vec{\Phi}_e = -m\vec{a}_e = -m(\vec{a}_0 + \vec{\omega}_0 \times (\vec{\omega}_0 \times \vec{\rho})) = -m(-\omega_0^2 \vec{R}_0 - \omega_0^2 \vec{\rho}_{xy}) = m\omega_0^2 (\vec{R}_0 + \vec{\rho}_{xy})$$

$$\vec{\Phi}_c = -m\vec{a}_c = -m \cdot 2(\vec{\omega}_0 \times \vec{\rho}).$$

где \vec{a}_e – переносное ускорение спутника, $\vec{\rho}_{xy}$ – проекция вектора $\vec{\rho}$ на плоскость Ox_0y_0 (рисунок 2), \vec{a}_c – ускорение Кориолиса.

Подставив выражения для сил в уравнение (1) и сократив на m , получим:

$$\ddot{\vec{\rho}} = -\omega_0^2 \left(\frac{R_0}{r} \right)^3 \vec{r} + \omega_0^2 (\vec{R}_0 + \vec{\rho}_{xy}) - 2(\vec{\omega}_0 \times \vec{\rho}). \quad (2)$$

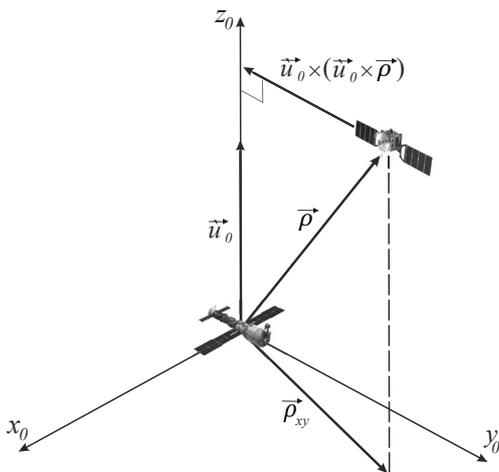


Рисунок 2. Орбитальная система координат

Для упрощения дальнейших вычислений линеаризуем $(R_0/r)^3$:

$$f(r) = \left(\frac{R_0}{r} \right)^3.$$

Разложим в ряд Тейлора функцию $f(r)$:

$$f(r) \approx f(R_0) + f'_r|_{r=R_0} \cdot (r - R_0) + \frac{1}{2} f''_r|_{r=R_0} \cdot (r - R_0)^2 + \dots$$

Порядок малости слагаемых, содержащих множитель $(r - R_0)$ в степенях выше первых, позволяет ими пренебречь:

$$f(r) \approx f(R_0) + f'_r|_{r=R_0} \cdot (r - R_0). \quad (3)$$

Найдем все слагаемые формулы (3):

$$f(R_0) = \left(\frac{R_0}{R_0} \right)^3 = 1,$$

$$f'_r = 3 \left(\frac{R_0}{r} \right)^2 \cdot \left(-\frac{R_0}{r^2} \right) = -3 \frac{R_0^3}{r^4},$$

$$f'_r(R_0) = -3 \frac{R_0^3}{R_0^4} = -\frac{3}{R_0}.$$

Используя правило треугольника для сложения векторов (рисунок 1), получим:

$$\vec{r} = \vec{R}_0 + \vec{\rho}.$$

Разложим вектор \vec{r} по единичным векторам:

$$\vec{r} = (R_0 + x)\vec{i} + y\vec{j} + z\vec{k}.$$

Вектор $y\vec{j} + z\vec{k}$ пренебрежимо мал по сравнению с вектором $(R_0 + x)\vec{i}$, поэтому с большой степенью точности можно принять:

$$r = R_0 + x,$$

откуда $r - R_0 = x$.

Подставляя найденные слагаемые в уравнение (3), получим:

$$f(r) \approx 1 - \frac{3}{R_0} x,$$

$$\left(\frac{R_0}{r} \right)^3 \approx 1 - 3 \frac{x}{R_0}.$$

Тогда уравнение (2) примет вид:

$$\ddot{\vec{\rho}} = 3\omega_0^2 \frac{x}{R_0} \vec{r} + \omega_0^2 (\vec{\rho}_{xy} - \vec{\rho}) - 2(\vec{\omega}_0 \times \vec{\rho}),$$

или в координатной форме:

$$\begin{aligned} \ddot{x}(t) &= 3\omega_0^2 x(t) + 2\omega_0 \dot{y}(t); \\ \ddot{y}(t) &= -2\omega_0 \dot{x}(t); \\ \ddot{z}(t) &= -\omega_0^2 z(t). \end{aligned} \quad (4)$$

Система (4) называется уравнениями Клохеси-Уилтшира, решив которую получим следующий закон движения спутника:

$$\begin{aligned}
 x(t) &= 4x_0 + \frac{2\dot{y}_0}{\omega_0} + \frac{\dot{x}_0}{\omega_0} \sin \omega_0 t - \left(3x_0 + \frac{2\dot{y}_0}{\omega_0} \right) \cos \omega_0 t; \\
 y(t) &= -(6\omega_0 x_0 + 3\dot{y}_0)t + y_0 - \frac{2\dot{x}_0}{\omega_0} + \left(6x_0 + \frac{4\dot{y}_0}{\omega_0} \right) \sin \omega_0 t + \frac{2\dot{x}_0}{\omega_0} \cos \omega_0 t; \\
 z(t) &= \frac{\dot{z}_0}{\omega_0} \sin \omega_0 t + z_0 \sin \omega_0 t.
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

$$\begin{aligned}
 \dot{x}(t) &= \dot{x}_0 \cos \omega_0 t + (3x_0 \omega_0 + 2\dot{y}_0) \sin \omega_0 t; \\
 \dot{y}(t) &= -(6\omega_0 x_0 + 3\dot{y}_0) + (6\omega_0 x_0 + 4\dot{y}_0) \cos \omega_0 t - 2\dot{x}_0 \sin \omega_0 t; \\
 \dot{z}(t) &= \dot{z}_0 \cos \omega_0 t - z_0 \omega_0 \sin \omega_0 t.
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

Система (5) описывает пассивное движение инспектора в окрестности КА. Если продифференцировать ее по времени, получим выражения для скоростей.

На основе уравнений (5) и (6) моделируются следующие этапы движения спутника-инспектора: приближение и остановка, выполнение которых обеспечивается двухимпульсным маневром, а также движение после остановки.

Процесс приближения осуществляется в течение заданного промежутка времени $[0, t_1]$ при помощи импульса наведения ΔV_1 , который сблизит спутник-инспектор и КА на необходимое расстояние. Для нахождения импульса ΔV_1 необходимо подставить в систему (5) начальные и конечные координаты спутника и решить ее относительно начальных скоростей.

В момент времени t_1 производится остановка спутника-инспектора посредством импульса замедления ΔV_2 , который мгновенно уменьшит набранную скорость до нуля и завершит сближение. Подстановкой начальных скоростей в систему (6) найдем скорости, с которыми спутник прилетит на безопасную границу. Тогда компоненты искомого импульса равны полученным скоростям, взятым с противоположным знаком.

Однако после остановки из-за воздействия внешних сил и сил инерции спутник через некоторое время начнет пассивное движение относительно КА, поэтому данный этап рассматривается с целью определения возможного столкновения в течение промежутка времени $(t_1, t_2]$.

Проведем исследование для конкретной задачи. Пусть спутник инспектор был выведен на орбиту исследуемого КА радиуса $R_0 = 6780 \cdot 10^3$ м на расстоянии 10 000 км от него. Под КА будем понимать Международную космическую станцию (МКС). И пусть необходимо приблизиться к МКС на минимально возможное расстояние, учитывая ее размеры ($\approx 73 \text{ м} \times 109 \text{ м} \times 30 \text{ м}$) [10]. Тогда условимся, что для таких маневров граница

безопасного приближения находится на расстоянии 100 м от центра масс МКС по каждой оси, т.е. получаем сферу радиусом 100 м (рисунок 3). Движение спутника будем рассматривать только в плоскости Ox_0y_0 . В начальный момент относительное движение спутника отсутствует.

На рисунке 3 цифрами 1 и 2 обозначены стартовые положения спутника на этапе приближения, а цифрами 3, 4, 5, 6 – конечные положения этого этапа. Разные масштабы осей использованы для наглядности рисунка. Тогда, комбинируя эти положения, получим следующие маршруты движения спутника:

$$\begin{aligned}
 &1 \rightarrow 3, 1 \rightarrow 4, 1 \rightarrow 5, 1 \rightarrow 6; \\
 &2 \rightarrow 3, 2 \rightarrow 4, 2 \rightarrow 5, 2 \rightarrow 6.
 \end{aligned}$$

Изменяя время, за которое спутнику необходимо сблизиться с МКС, проведем три эксперимента для построенных маршрутов. Т.е. для трех разных интервалов времени сближения получим 24 траектории движения спутника.

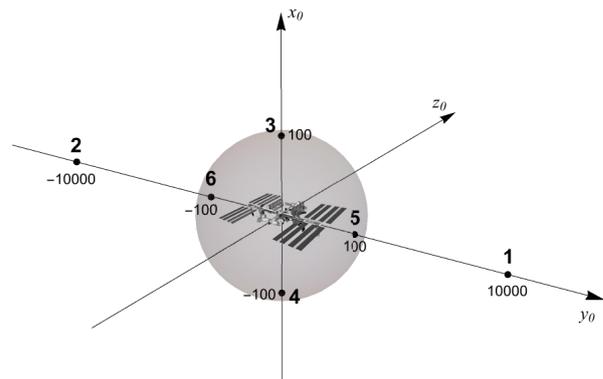


Рисунок 3. Граница безопасного приближения, положения спутника

Моделирование этапа сближения и остановки

Пусть в первом эксперименте спутнику необходимо приблизиться к МКС за один час, во втором – за два часа, а в третьем – за три.

Продemonстрируем результаты экспериментов на примере маршрута $1 \rightarrow 3$.

В первом эксперименте спутник-инспектор прилетает точно на границу безопасного приближения, не пересекая ее (рисунок 4). Следовательно, для заданных начальных условий сближение спутника с МКС пройдет без столкновений, т.е. сближение будет безопасным. В таблице 1 представлены результаты моделирования движения по всем возможным восьми маршрутам в первом численном эксперименте.

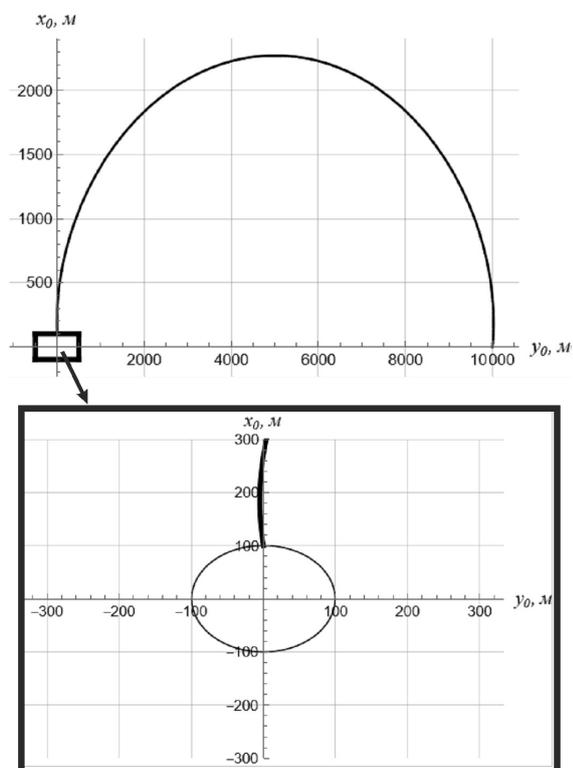


Рисунок 4. Эксперимент №1: траектория движения спутника-инспектора в плоскости Ox_0y_0

Таблица 1. Результаты эксперимента №1

Маршрут	ΔV_1 , м/с	ΔV_2 , м/с	Результат
1 → 3	1,5802	1,5923	безопасное сближение
1 → 4	1,7223	1,7334	столкновение
1 → 5	1,6344	1,6344	столкновение
1 → 6	1,6674	1,6674	безопасное сближение
2 → 3	1,7223	1,7334	столкновение
2 → 4	1,5802	1,5923	безопасное сближение
2 → 5	1,6674	1,6674	безопасное сближение
2 → 6	1,6344	1,6344	столкновение

Во втором эксперименте спутник пересекает границу безопасного приближения, и все по-

следующее движение продолжает внутри этой границы (рисунок 5). Таким образом, на этапе приближения произойдет столкновение спутника с МКС. В таблице 2 представлены результаты моделирования движения по всем возможным восьми маршрутам во втором численном эксперименте.

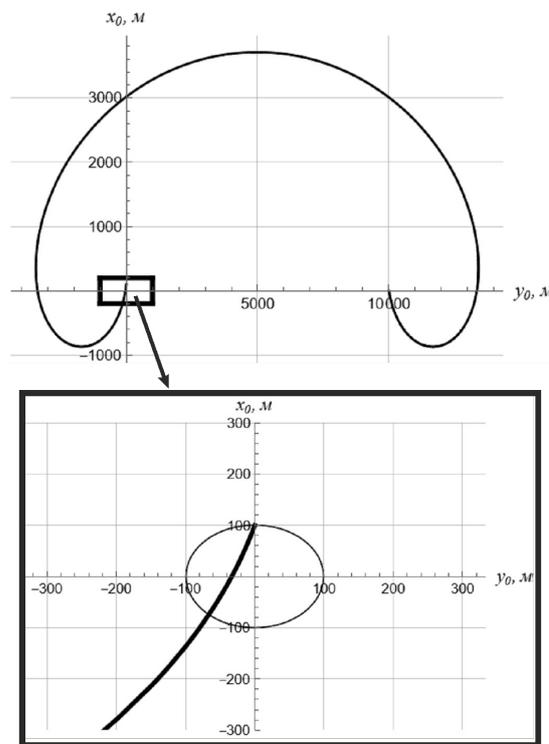


Рисунок 5. Эксперимент №2: траектория движения спутника-инспектора в плоскости Ox_0y_0

Таблица 2. Результаты эксперимента №2

Маршрут	ΔV_1 , м/с	ΔV_2 , м/с	Результат
1 → 3	2,1859	2,1947	столкновение
1 → 4	2,5333	2,5409	безопасное сближение
1 → 5	2,3356	2,3356	безопасное сближение
1 → 6	2,3828	2,3828	столкновение
2 → 3	2,5333	2,5409	безопасное сближение
2 → 4	2,1859	2,1947	столкновение
2 → 5	2,3828	2,3828	столкновение
2 → 6	2,3356	2,3356	безопасное сближение

В третьем эксперименте траектория движения спутника вблизи МКС не пересекает границу безопасного приближения (рисунок 6). Значит сближение спутника с МКС так же, как и в первом эксперименте, будет безопасным. Результаты

третьего эксперимента для каждого маршрута приведены в таблице 3.

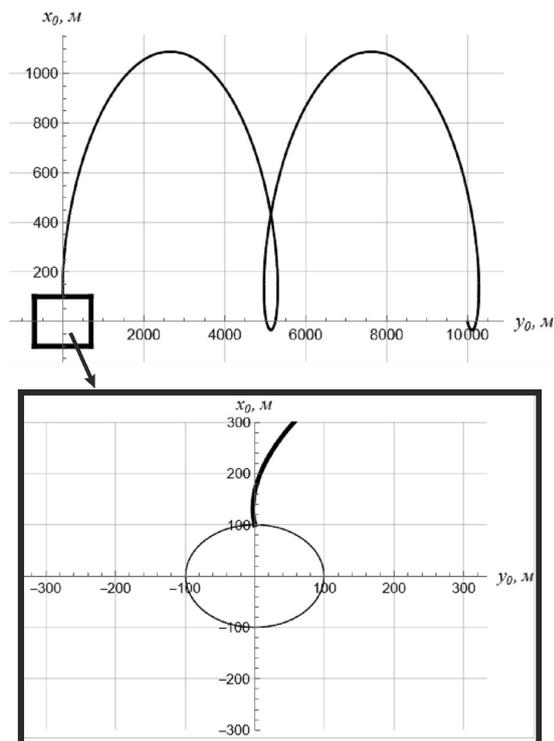


Рисунок 6. Эксперимент №3: траектория движения спутника-инспектора в плоскости Ox_0y_0

Таблица 3. Результаты эксперимента №3

Маршрут	ΔV_1 , м/с	ΔV_2 , м/с	Результат
1 → 3	0,3711	0,4196	безопасное сближение
1 → 4	0,5244	0,5598	безопасное сближение
1 → 5	0,3122	0,3122	столкновение
1 → 6	0,3185	0,3185	безопасное сближение
2 → 3	0,5244	0,5598	безопасное сближение
2 → 4	0,3711	0,4196	безопасное сближение
2 → 5	0,3185	0,3185	безопасное сближение
2 → 6	0,3122	0,3122	столкновение

Результаты трех экспериментов показывают, что нет однозначно безопасных маршрутов. Результаты, помимо прочего, зависят от заданного времени сближения. Влияние времени сближения на безопасность маршрутов является предметом дальнейшего исследования.

Моделирование этапа пассивного движения

Рассмотрим этап пассивного движения спутника после безопасного сближения с МКС и проведем еще два эксперимента. Начальным положением спутника в данном этапе является его конечное положение на этапе сближения, т.е. в начальный момент времени спутник-инспектор находится на границе безопасного приближения в точках 3, 4, 5, 6 (рисунок 3).

Пусть в первом эксперименте начальное положение спутника находится на оси Ox (положения 3, 4 на рисунке 3), а во втором – на оси Oy (положения 5, 6 на рисунке 3). Проведем исследование в течение первых 30 минут пассивного движения спутника.

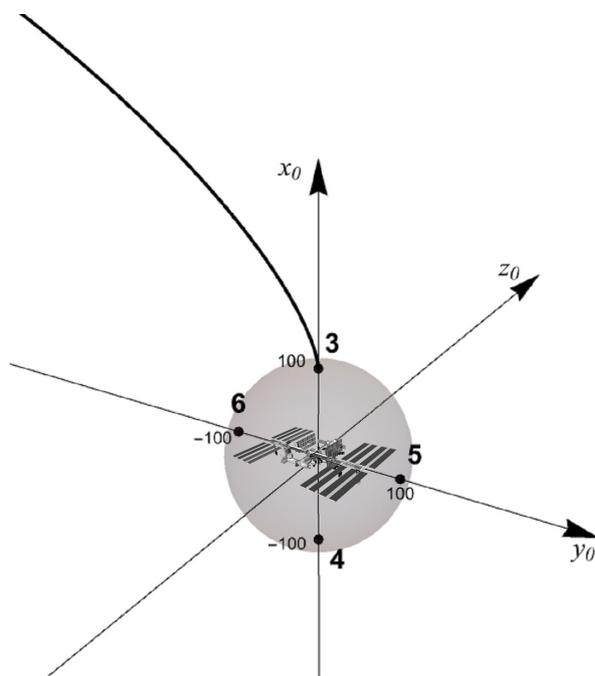


Рисунок 7. Эксперимент №4: траектория движения спутника-инспектора в трехмерном пространстве

Рисунки 7 и 8, на которых спутник начинает движение из положения 3, показывают, что инспектор находится максимально близко с МКС в течение примерно 100 первых секунд своего пассивного движения, затем с течением времени он отдаляется без столкновений, не пересекая границу безопасного приближения. Таким образом, спутник-инспектор может наблюдать за МКС из положения 3 в течение некоторого ограниченного времени, за которое он должен собрать всю необходимую информацию или выполнить другую поставленную ему задачу.

Для начального положения 4 получается аналогичный результат (в статье он не иллюстрируется).

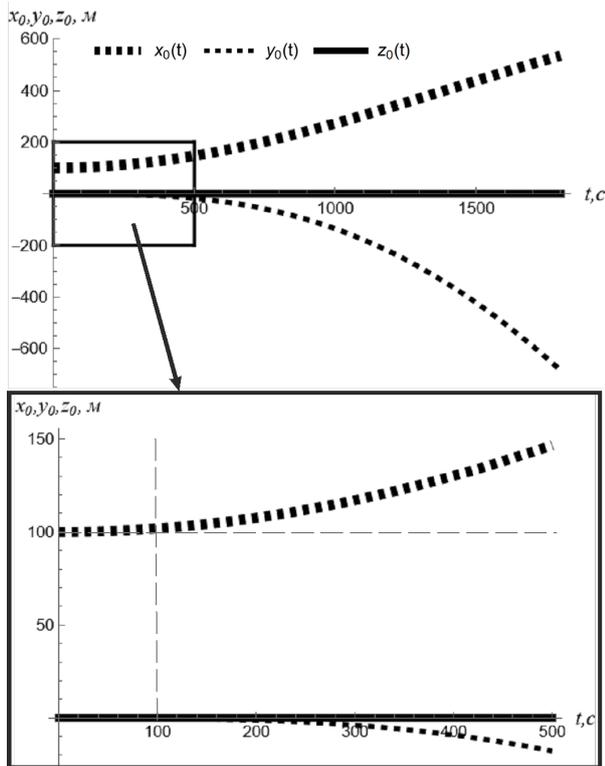


Рисунок 8. Эксперимент №4: изменение координат спутника-инспектора

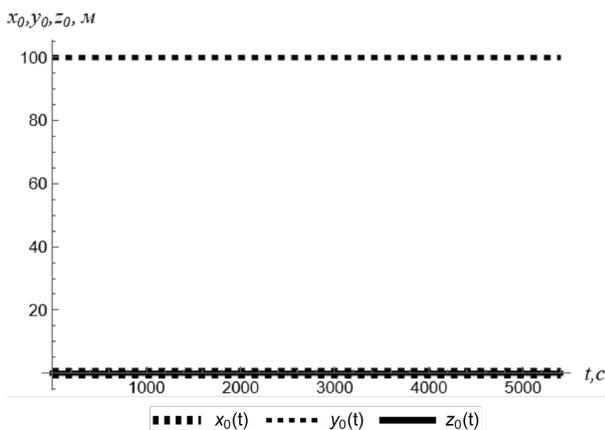


Рисунок 9. Эксперимент №5: изменение координат спутника-инспектора

На рисунке 9, где спутник начинает движение из положения 5, видно, что координаты инспектора с течением времени не изменяются, поэтому он будет находиться максимально близко с МКС в течение всего времени пассивного движения. Т.е. спутник и МКС будут двигаться вместе, т.к. они находятся на одной орбите и движутся с одинаковыми первыми космическими скоростями. Аналогичный результат получим и для начального положения 6.

Заключение

Таким образом, приведенные в статье уравнения относительного движения позволили произвести оценку параметров сближения спутника-инспектора и КА, а также сделать вывод о безопасности подобных маневров.

На основе результатов трех экспериментов сближения можно сделать вывод, что, изменяя время, в течение которого спутнику-инспектору необходимо приблизиться к КА, его начальные условия могут оказаться как благоприятными для сближения, так и привести к столкновению.

Кроме того, результаты двух экспериментов для этапа пассивного движения после безопасного сближения показали, что наиболее удобными положениями спутника для длительного наблюдения за МКС являются точки 5 и 6, т.е. когда спутник и МКС находятся на одной орбите.

Результаты работы можно использовать при проектировании спутника-инспектора или КА, в задачу которых входит сближение (а возможно и стыковка) с другими космическими объектами, при расчете требуемого объема рабочего тела, при выборе двигателей и т.д.

Литература

1. Патель И.К., Тихонов А.А. Бесконтактный захват и удаление объекта космического мусора с помощью электромагнитной индукции // Вестник Санкт-Петербургского университета. Математика. Механика. Астрономия. 2021. Т. 8, № 4. С. 670–682.
2. Hill G.W. Researchers in the Lunar Theory // American Journal of Mathematics. 1878. Vol. 1. P. 5–26.
3. Clohessy W.H., Wiltshire R.S. Terminal guidance system for satellite rendezvous // Journal of the Aerospace Sciences. 1960. Vol. 27, no. 9. P. 653–658.
4. Релейная автономная система управления группировкой спутников, базирующейся на низкой околоземной орбите / К.А. Богданов [и др.] // Космическая техника и технологии. 2020. № 1 (28). С. 98–110.
5. Палкин М.В. Баллистико-навигационное обеспечение группового полета космических аппаратов // Вестник московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2015. № 6. С. 22–32.
6. Овчинников М.Ю. Динамика и управление перспективными многоэлементными орбитальными системами // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2011. № 4 (2). С. 255–257.
7. Методы сближения на орбите / В.Н. Кубасов [и др.]. М.: Машиностроение, 1985. 183 с.

8. Механика космического полета: учебник для вузов / М.С. Константинов [и др.]; под ред. В.П. Мишина. М.: Машиностроение, 1989. 408 с.
9. Маркеев А.П. Теоретическая механика: учебник для вузов. М.: ЧеРо, 1999. 572 с.
10. Международная космическая станция – история, устройство, факты. URL: <https://nauka-prosto.ru/page/mezhdunarodnaya-kosmicheskaya-stantsiya/> (дата обращения: 10.11.2023).

Получено 14.11.2023

Алексеев Алексей Владимирович, к.т.н., доцент кафедры теоретической механики Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева (Самарский университет). 443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34. Тел. +7 927 696-09-30. E-mail: alekseev.av@ssau.ru

Ефременкова Владислава Владимировна, студентка кафедры теоретической механики Самарского университета. 443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34. Тел. +7 937 667-11-41. E-mail: vladaefr@mail.ru

DETERMINATION OF THE CONDITIONS FOR THE SAFE APPROACH OF AN INSPECTOR SATELLITE WITH A SPACECRAFT IN EARTH ORBIT

Alekseev A.V., Efremenkova V.V.

Samara National Research University, Samara, Russian Federation

E-mail: alekseev.av@ssau.ru

The article is devoted to the study of the movement of the inspector satellite in the vicinity of the observed spacecraft. The inspector satellite is developed in order to monitor the spacecraft, carry out timely maintenance in order to eliminate malfunctions for its further functioning, refueling, towing, etc. One of the most important stages of the satellite is the approach to the spacecraft, which is planned by modeling using the equations of relative orbital motion, which generation is presented in this article. The rendezvous procedure is carried out by two-pulse maneuver. The article also describes conducted numerical experiments modeling the approach under different initial conditions, in which conditions for collision and safe approach of the satellite with the spacecraft, the most convenient observation positions near the spacecraft and the time when it can be observed are determined.

Keywords: *inspector satellite, spacecraft, approach, collision, two-pulse maneuver, equations of relative orbital motion, Clohessy-Wiltshire equations*

DOI: 10.18469/ikt.2023.21.2.05

Alekseyev Alexey Vladimirovich, Samara National Research University, 34, Moskovskoe shosse, Samara, 443086, Russian Federation; Associate Professor of Theoretical Mechanics Department, PhD in Technical Science. Tel. +7 927 696-09-30. E-mail: alekseev.av@ssau.ru

Efremenkova Vladislava Vladimirovna, Samara National Research University, 34, Moskovskoe shosse, Samara, 443086, Russian Federation; Student of Theoretical Mechanics Department. Tel. +7 937 667-11-41. E-mail: vladaefr@mail.ru

References

1. Patel I.K., Tikhonov A.A. Contactless capture and removal of a space debris object using electromagnetic induction. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo Universiteta. Matematika. Mekhanika. Astronomiya*, 2021, vol. 8, no. 4, pp. 670–682. (In Russ.)
2. Hill G.W. Researchers in the Lunar Theory. *American Journal of Mathematics*, 1878, vol. 1, no. 1, pp. 5–26.
3. Clohessy W.H., Wiltshire R.S. Terminal guidance system for satellite rendezvous. *Journal of the Aerospace Sciences*, 1960, vol. 27, no. 9, pp. 653–658. (In Russ.)
4. Bogdanov K.A. et al. Autonomous relay control system for satellite formation operating in low earth orbit. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii*, 2020, no.1(28), pp. 98–110. (In Russ.)

5. Palkin M.V. Ballistic and navigation issues for satellite formation flying design. *Vestnik moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Baumana. Seriya: Mashinostroenie*, 2015, no. 6, pp. 22–32. (In Russ.)
6. Ovchinnikov M. Yu. Dynamics and control of promising multi-element orbital systems. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo*, 2011, no. 4 (2), pp. 255–257. (In Russ.)
7. Kubasov V.N. et al. *Methods of rendezvous in orbit*. Moscow: Mashinostroenie, 1985. 183 p. (In Russ.)
8. Konstantinov M.S. et al. *Mechanics of space flight: Textbook for Universities*; Ed. by V.P. Mishin. Moscow: Mashinostroenie, 1989. 408 p. (In Russ.)
9. Markeev A.P. *Theoretical mechanics: Textbook for Universities*. Moscow: Chero, 1999, 572 p. (In Russ.)
10. International Space Station – history, device, facts. URL: <https://nauka-prosto.ru/page/mezhdunarodnaya-kosmicheskaya-stantsiya> (accessed: 10.11.2023). (In Russ.)

Received 14.11.2023

ТЕХНОЛОГИИ КОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМ И СЕТЕЙ

004.724.4

АНАЛИЗ ГРАНИЧНЫХ ЗАДЕРЖЕК В СЕТИ TSN ETHERNET

Сударева М.Е.¹, Яшин В.Н.²

¹ Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, РФ

² Самарский государственный технический университет, Самара, РФ

E-mail: masha_sudareva@mail.ru

В статье описывается анализ граничных задержек в сетях TSN (Time-Sensitive Networking/ Синхронизирующиеся по времени сети) Ethernet с помощью детерминированного анализа, который строится на основе сетевого исчисления. Сегодня интернет-сети успешно сокращают операционные сквозные задержки до десятков миллисекунд, но современным приложениям необходимы более кратковременные задержки. Именно сверхкороткие или граничные задержки (ULL) позволяют реализовать требования к современным приложениям. Задержки являются критическим фактором в такой сфере, как телемедицина. Например, в телехирургии требуется подключение к сети практически в режиме реального времени. В статье представлены результаты проведенного анализа сети TSN Ethernet в графической форме наряду с графической интерпретацией оценки задержки в сети TSN Ethernet.

Ключевые слова: TSN, детерминированный анализ, сетевое исчисление, сквозная задержка, граничные задержки, кривая поступления, кривая обслуживания

Введение

Традиционные интернет-сети, которые обеспечивают сквозное соединение для пользователей, успешно сокращают операционные сквозные задержки только до десятков миллисекунд. Однако нынешние и будущие приложения требуют сверхнизкие или граничные задержки ULL (Ultra Low Latency) [1]. Критически важны задержки в медицинских приложениях для телехирургии и транспорта, так как требуют подключения к сети почти в реальном времени. Требования к пропускной способности в значительной степени зависят от потребностей приложений, которые могут широко варьироваться от небольших объемов данных интернет вещей IoT (Internet of Things) до крупных обменов мультимедийными данными, передаваемыми в облако и из облака [2].

Тематика исследования граничных задержек в сетях, чувствительных ко времени TSN (Time Sensitive Networking) Ethernet, заключается в том, что в таких разнородных средах, как автомобильные транспортные средства, дополненная и виртуальная реальность AR/VR (Augmented reality/Virtual Reality), а также роботизированные приложения, которые необходимы для промышленного интернета вещей IIoT (Industrial Internet of Things), могут потребоваться как высокие скорости передачи данных, так и ULL [3]. Высокие скорости передачи данных могут потребоваться для передачи видеопотока с камер, которые используются для управления транспортными средствами и роботами, а в приложениях будет очень полезен специальный механизм для универсального удовлетворения разнообразных требований ULL.

Исходя из вышеперечисленных аспектов, можно сделать вывод, что данное исследование имеет актуальность [4].

Технология TSN Ethernet

Представим сеть TSN в виде графа, состоящего из набора узлов, которые могут быть либо конечными системами (ES), либо коммутаторами (SW), подключенными через физические каналы. Предполагается, что каналы являются полнодуплексными, что позволяет осуществлять связь в обоих направлениях. Пример проиллюстрирован на рисунке 1, где есть 4 конечных системы, от ES1 до ES4, и 3 переключателя, от SW1 до SW3.

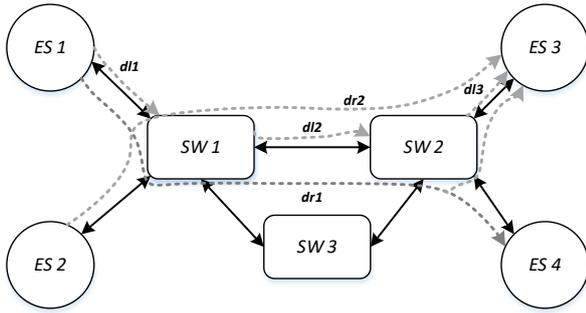


Рисунок 1. Пример топологии сети TSN

Топология сети TSN моделируется как неориентированный граф, где $V = ES \cup SW$ – это набор конечных систем (ES) и коммутаторов (SW), а E – набор физических каналов. Для рисунка 1

$V = ES \cup \{ES1; ES2; ES3; ES4\} \cup \{SW1; SW2; SW3\}$, а физические ссылки показаны двойными черными стрелками. Связь с потоком данных $dl_i = [v_a; v_b] \in L$, где L – это набор каналов передачи данных в сети, является направленным ребром от v_a к v_b , где v_a и $v_b \in V$ могут быть ESes или SWs. Скорость физического канала обозначается как $dl_k * C$. Предположим то, что все физические ссылки имеют одинаковую скорость C . Поскольку существует только один выходной порт для каждой ссылки потока данных, dl_k также может ссылаться на выходной порт h в v_a , связанный со ссылкой на v_b . Маршрутизация потока данных $dr_k \in R$ представляет собой упорядоченную последовательность каналов потока данных, соединяющих единственную исходную ES с одной или несколькими ES назначения. Например, на рисунке 1 $dr1$ соединяет исходную оконечную систему ES1 с оконечными системами назначения ES3 и ES4, а $dr2$ соединяет ES2 с ES3.

Задачи приложений, работающих в ESes, обмениваются данными через потоки, которые имеют один источник и могут иметь несколько пунктов назначения. Несмотря на то, что в сети может быть

некритическая связь, рассмотрим критические потоки, которые имеют требования в реальном времени. Определим $\tau = \bigcup_k \tau_{TTk}$ как множество всех критических потоков в сети TSN [5].

Как уже упоминалось, стандарт TSN поддерживает разные приоритеты для критических потоков TT (Time-Triggered). Предполагается, что приоритет P_m при $m \in [1; 8]$ для каждого критического потока TT был определен разработчиком системы. Более того, для каждого потока TT $\tau_{TTk} \in \tau$, известен размер кадра l_{TTk} , период P_{TTk} в исходной ES и статически определенную маршрутизацию dr_{TTk} .

Оценка наилучшего случая передаваемых в сети задержек и задержек потоков производится путем внедрения теории сетевого исчисления, которая, в свою очередь, разработана для детерминированного анализа производительности сетевой связи. Операция свертки min-plus алгебры ($\min; +$) определяет кривые поступления и обслуживания, которые для проведения анализа осуществляют их построение, а также описывают доступность сетевых узлов и поведение потоков.

$R(t)$ – это подсчитанное общее, входящее в сеть до момента t , количество битов, представляющее совокупность функции ввода потока, которые моделируют процесс поступления с помощью кривой поступления $\alpha(t)$. Только при:

$$R(t) \leq \inf_{0 \leq s \leq t} \{R(s) + \alpha(t-s)\} = (R \otimes \alpha)(t),$$

где $R(s)$ – функция потока;

$\alpha(t)$ – кривая поступления, которая описывает границу потока $R(s)$;

$(t-s)$ – любой период, на интервале от 0 до t , в течение которого $\alpha(t)$ будет кривой поступления для потока $R(s)$;

\otimes – операция свертки min-plus;

\inf – выражает infimum, т.е. точную нижнюю границу.

Примером кривой поступления является модель маркерной корзины, описываемая максимальным скачок потока (σ) и верхней границей долгосрочной средней скорости потока (ρ) [6].

Кривая обслуживания $\beta(t)$ моделирует обрабатывающую способность доступного ресурса. Пусть, подсчитывает общее количество битов потока, выходящего из сетевого узла до момента времени t , процесс отправления $R^*(t)$, представляющий кумулятивную, т.е. накапливающую функцию выхода. Сетевой узел предлагает кривую обслуживания $\beta(t)$ для потока, если:

$$R(t) \leq \inf_{0 \leq s \leq t} \{R(s) + \beta(t-s)\} = (R \otimes \beta)(t),$$

где $R(s)$ – функция потока;

$\beta(t)$ – кривая обслуживания, которая описывает границу потока $R(s)$;

$(t - s)$ – любой период, на интервале от 0 до t , в течение которого $\beta(t)$ будет кривой обслуживания для потока $R(s)$;

\otimes – операция свертки min-plus;

\inf – выражает infimum, т.е. точную нижнюю границу.

Типичным примером кривой обслуживания является кривая обслуживания «скорость-задержка» вида:

$$\beta_{R,T}(t) = R[t - T]^+,$$

где R – скорость обслуживания;

t – момент времени;

T – задержка обслуживания;

$[x]^+$ – равна x , если $x \geq 0$, и 0 в противном случае.

Задержка, которую испытывает поток в сетевом узле, будет ограничена между графиками двух кривых, тогда максимальное горизонтальное отклонение будет:

$$h(\alpha, \beta) = \sup \{ \inf \{ \tau \geq 0 \mid \alpha(s) \leq \beta(s + \tau) \} \},$$

где \sup – точная верхняя граница или супремум;

\inf – выражает infimum, т.е. точную нижнюю границу;

$\alpha(t)$ – кривая поступления, которая ограничивает поток $R(s)$;

$\beta(t)$ – кривая обслуживания, которая описывает границу потока $R(s)$.

Проанализируем ограниченный маркерной корзиной поток $\alpha_{\sigma,\rho}(t)$ и кривую обслуживания скорость/время ожидания, в узле $\beta_{R,T}(t)$ [5].

Наихудшая задержка проиллюстрирована с помощью двойной серой стрелки, обозначенной буквой $h(\alpha; \beta)$ на рисунке 2.

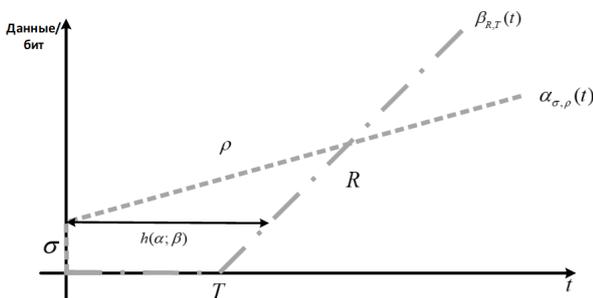


Рисунок 2. Основная схема снятия

Наихудшая сквозная задержка потока представляет собой сумму пределов задержки в сетевых узлах вдоль его маршрутизированного пути виртуального канала [7].

Важно получить суммарную кривую поступления, для потоков, которые конкурируют

на выходном порту, а также предоставленную устройством кривую обслуживания, чтобы получить для критического потока в узле входного порта задержку. По маршрутизированному пути распространяются границы задержки, из чего и получается для критического потока наихудшая сквозная задержка WCD (Worst-Case end-to-end Delay).

Существует с разными уровнями приоритета $P_m (1 \leq m \leq n)$ для критического графика $n (1 \leq n \leq 8)$ очередей. В свою очередь в те же очереди входят с разными уровнями приоритета критические потоки P_m . Кадры в каждой очереди следуют порядку «первым пришел – первым обслужен» FIFO (First in, First out), и кадры имеют более высокий приоритет в очереди Q_{P_m} , чем в очереди $Q_{P_{m+1}}$. Пересылка кадров осуществляется тогда, когда связанный со шлюзом G_{P_m} , для управляемой GCL очереди Q_{P_m} , которая в свою очередь управляется открытыми $G_{P_m}(t) = 1$ и закрытыми состояниями $G_{P_m}(t) = 0$, шлюз открыт. На рисунке 3 проиллюстрировано открытие и открытие-закрытие шлюза G_{P_m} , цикл которого равен T_{P_m} , длина же в цикле открытия-закрытия в свою очередь равна L_{P_m} .

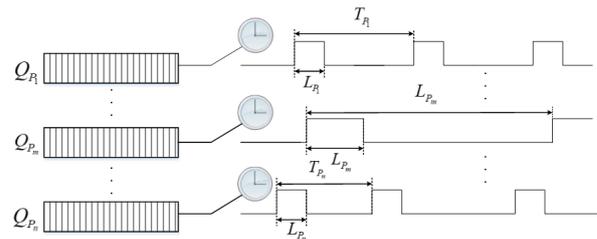


Рисунок 3. Процесс открытия и открытия входа каждой очереди

До момента закрытия шлюза, определяется время отправки всего кадра, которое в свою очередь определяет механизм опережающего просмотра, для каждого класса трафика, утвержденный стандартом 802.1Qbv. Время простоя, т.е. защитная полоса, определяется, когда переадресация кадра до следующего открытого окна не может быть возможна и возникает в конце текущего открытого окна. Максимальный размер передаваемого блока Ethernet MTU (Maximum Transmission Unit) в 1500 байтов в худшем случае больше защитной полосы. Критический кадр, уже находящийся на передаче, не может быть прерван кадром с более высоким приоритетом. Это подразумевает политика не приоритетного прерывания, т.е. отсутствие поддержки IEEE 802.1Qbv, если шлюзы открыты в то же время. Из-за возможного перекрытия с открытыми окнами других важных очередей, служебный ре-

курс, во время открытого окна Q_{P_m} для трафика P_m может быть не выделен [8].

Взаимоисключающей и специализированной для каждого класса трафика является услуга TDMA (Time Division Multiple Access), которая отличается от службы в одном узле для критического трафика с P_m . Из этого следует то, что повторяется, с фиксированной длиной цикла, временной интервал TDMA для трафика с нижней границей, т.е. гарантированной услугой. Но, как можно предположить, может возникнуть перекрытие, и для трафика P_m не будет выделен временной интервал обслуживания, управляемый GCL (Gate Control List) в TSN.

Необходимо получить длительность $\overline{L_{P_m}}$ временного интервала, для гарантированного обслуживания в каждом открытом окне Q_{P_m} от P_m , чтобы получить кривую обслуживания для трафика P_m . На рисунке 4 проиллюстрирована связь максимальной защитной полосы перед каждым открытым окном Q_{P_m} , которая зависит не только от наихудшего перекрытия критического трафика с более высоким и низким приоритетом.

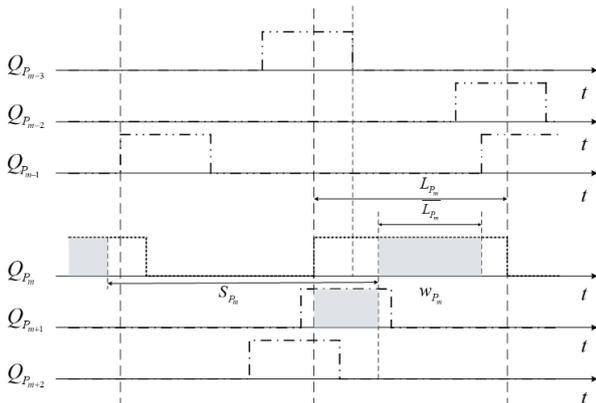


Рисунок 4. Гарантированный временной интервал в открытом окне

Первый кадр периода ожидания P_m получает услугу из соответствующего временного интервала что является максимальным временем ожидания S_{P_m} , которое в свою очередь связано с наихудшим перекрытием с другим приоритетным трафиком и максимальным размером кадра в Q_{P_m} .

Из-за различных ситуаций перекрытия с очередями с более высоким и более низким приоритетом, длина временного интервала $\overline{L_{P_m}}$ гарантированного обслуживания является переменной в разных открытых окнах Q_{P_m} , что и отмечено на рисунке 5 как $\overline{L_{P_m}^{-1}}$, $\overline{L_{P_m}^{-2}}$ и $\overline{L_{P_m}^{-3}}$.

Первый кадр периода ожидания P_m получает услугу из соответствующего временного интервала что является максимальным временем ожидания S_{P_m} , которое в свою очередь связано с наихудшим

перекрытием с другим приоритетным трафиком и максимальным размером кадра в Q_{P_m} [9].

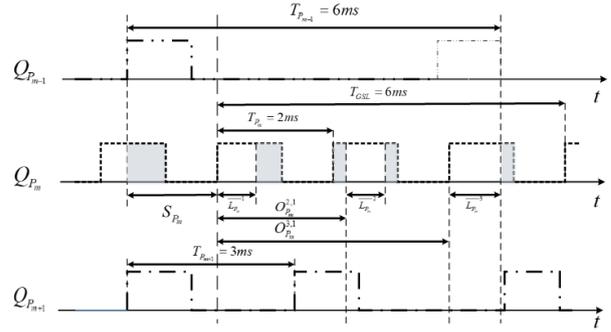


Рисунок 5. Гарантированный временной интервал в открытом окне

Из-за различных ситуаций перекрытия с очередями с более высоким и более низким приоритетом, длина временного интервала $\overline{L_{P_m}}$ гарантированного обслуживания является переменной в разных открытых окнах Q_{P_m} , что и отмечено на рис. 6 как $\overline{L_{P_m}^{-1}}$, $\overline{L_{P_m}^{-2}}$ и $\overline{L_{P_m}^{-3}}$.

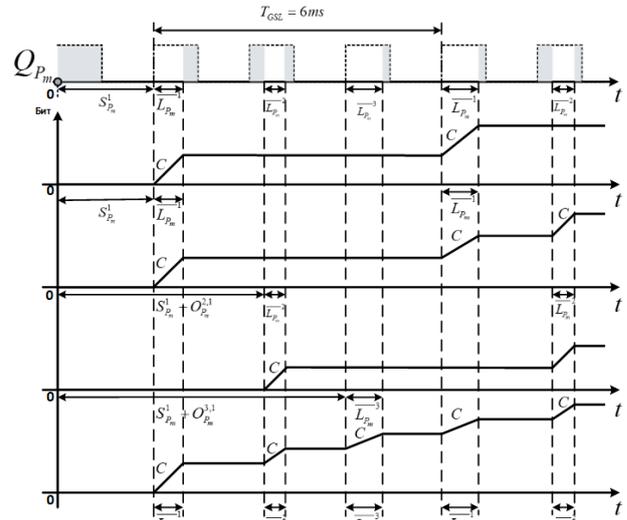


Рисунок 6. Гарантированные временные интервалы для P_m

Стоит обратить внимание на то, что наименьшим общим кратным LCM (Least Common Multiple) циклов открытия-закрытия T_{P_m} ($1 \leq m \leq n$) для всех очередей приоритета критического трафика, является GCL выходной порт, перекрывающийся отношением повторяющегося гиперпериода T_{GCL} . Для гарантированного временного интервала трафика P_m , существует ограничение количества случаев длины L_{P_m} , которое обозначается как N_{P_m} . Например, N_{P_m} равно 3, когда $T_{P_{m-1}} = 6$ мс, $T_{P_m} = 2$ мс, $T_{P_{m+1}} = 3$ мс и, следовательно, гиперпериод $T_{GCL} = 6$ на рисунок 6 [10].

Гарантированное обслуживание для P_m , трафика теряет периодичность T_{P_m} . Чтобы представить взаимное расположение соседнего гарантиро-

ванного временного интервала, определим относительное смещение $\sigma_{P_m}^{j,i}$ ($j \in [i+1, i+N_{P_m}-1]$), которое представляет собой временной интервал между временем начала i -го и j -го гарантированных временных интервалов для P_m трафика, если принять i -й гарантированный временной интервал в качестве эталона. Например, на рисунке 6, $\sigma_{P_m}^{2,1}$ и $\sigma_{P_m}^{3,1}$ соответственно представляют относительные смещения между $\overline{L_{P_m}^1}$ и $\overline{L_{P_m}^2}$, а также между $\overline{L_{P_m}^1}$ и $\overline{L_{P_m}^3}$, принимая гарантированное окно обслуживания с длиной $\overline{L_{P_m}^1}$ в качестве эталона. Обратите внимание, что $\sigma_{P_m}^{j,i}$ равно 0, если $j = i$.

Теорема 1: возможная кривая обслуживания $\beta_{P_m}^i(t)$ для критического трафика приоритета P_m с учетом гарантированного временного интервала $\overline{L_{P_m}^i}$ ($i = 1; \dots; N_{P_m}$) в качестве эталона определяется формулой (5) и (6):

$$\beta_{P_m}^i(t) = \sum_{j=i}^{i+N_{P_m}-1} \beta_{P_m}^{j,i}(t),$$

где

$$\beta_{P_m}^{j,i}(t) = \beta_{T_{GCL}, \overline{L_{P_m}^j}}(t + T_{GCL} - \overline{L_{P_m}^j} - S_{P_m}^i - \sigma_{P_m}^{j,i}),$$

$\beta_{T,L}$ – классическая кривая обслуживания моделей изменяющегося потока в сочетании с протоколом TDMA [11].

$$\beta_{T,L}(t) = C * \max\left[\frac{t}{T}L, t - \left\lceil \frac{t}{T} \right\rceil (T - L)\right].$$

Доказательство: принятие гарантированного временного интервала $\overline{L_{P_m}^i}$ в качестве эталона означает, что первый кадр периода отставания P_m получит услугу, начиная с временного интервала $\overline{L_{P_m}^i}$. Затем отдельно рассматривается N_{P_m} – последовательности периодических гарантированных временных интервалов, которые отдельно повторяются в соответствии с гиперпериодом T_{GCL} , чтобы получить кривую обслуживания, например, на рисунке 7.

Обслуживание трафика P_m не может быть гарантировано ни в каком временном интервале $0 \leq \Delta = t - t_0 < S_{P_m}^i + \sigma_{P_m}^{j,i}$, тогда для периодической последовательности временных интервалов обслуживания длина равна $\overline{L_{P_m}^j}$ ($i \leq j \leq i + N_{P_m} - 1$). В любом временном интервале $S_{P_m}^i + \sigma_{P_m}^{j,i} \leq \Delta \leq S_{P_m}^i + \sigma_{P_m}^{j,i} + \overline{L_{P_m}^j}$, можно гарантировать обслуживание $C * (\Delta - S_{P_m}^i - \sigma_{P_m}^{j,i})$ [12].

Кроме того, поскольку гарантированный временной интервал $\overline{L_{P_m}^j}$ повторяется с T_{GCL} , услуга в течение любого временного интервала $S_{P_m}^i + \sigma_{P_m}^{j,i} + \theta$.

$$T_{GCL} + \overline{L_{P_m}^j} \leq \Delta < S_{P_m}^i + \sigma_{P_m}^{j,i} + (\theta + 1) * T_{GCL} (\forall \theta \in \mathbb{N})$$

не может быть гарантирован для P_m – трафика, в то время, как обслуживание $C * (\Delta - (S_{P_m}^i + \sigma_{P_m}^{j,i} + (\theta + 1) * T_{GCL}))$ в любом временном интервале

$$\begin{aligned} S_{P_m}^i + \sigma_{P_m}^{j,i} + (\theta + 1) * T_{GCL} &\leq \Delta \leq \\ &\leq S_{P_m}^i + \sigma_{P_m}^{j,i} + (\theta + 1) * T_{GCL} + \overline{L_{P_m}^j}, \end{aligned}$$

может быть гарантирована для трафика P_m . Для последовательности периодических временных интервалов с длиной $\overline{L_{P_m}^j}$, кривая обслуживания задается как:

$$\beta_{P_m}^{j,i}(t) = \beta_{T_{GCL}, \overline{L_{P_m}^j}}(t + T_{GCL} - \overline{L_{P_m}^j} - S_{P_m}^i - \sigma_{P_m}^{j,i}),$$

где $\beta_{T_{GCL}, \overline{L_{P_m}^j}}(t)$ – классическая кривая обслуживания TDMA;

$S_{P_m}^i - \sigma_{P_m}^{j,i}$ – относительное смещение от времени начала t_0 периода до времени начала гарантированного временного интервала $\overline{L_{P_m}^j}$ [7].

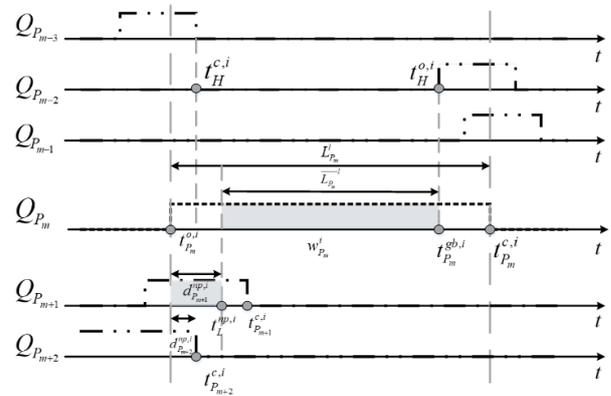


Рисунок 7. Граничный вид обслуживания на основе эталонного теста

В качестве эталона из суммы кривых обслуживания каждой периодической последовательности, состоящей из временных интервалов длиной $\overline{L_{P_m}^j}$ ($i \leq j \leq i + N_{P_m} - 1$) как показано, например, на рисунке 6.

Получается возможная кривая обслуживания для трафика P_m с использованием гарантированного временного интервала $\overline{L_{P_m}^i}$, что и проиллюстрировано на рисунке 6.

До сих пор были выведены возможные кривые N_{P_m} обслуживания $\beta_{P_m}^i(t)$ ($i = 1; \dots; N_{P_m}$) для трафика P_m , рассмотренные различными гарантированными временными интервалами в гиперпериоде в качестве эталонов. Тогда кривая обслуживания $\beta_{P_m}(t)$ для трафика P_m является наихудшим случаем из всех возможных кривых обслуживания, то есть нижней огибающей $\beta_{P_m}^i(t)$:

$$\beta_{P_m}(t) = \min_{1 \leq i \leq N_{P_m}} \{\beta_{P_m}^i(t)\},$$

где $\beta_{P_m}^i(t)$ – кривая обслуживания для трафика P_m .

Заключение

Что бы рассмотреть проблему анализа граничных задержек в сетях TSN, была построена прикладная модель сети TSN в виде графа и осуществлен детерминированный анализ сети. В данном анализе была представлена модель сети TSN Ethernet на базе теории сетевого исчисления, в которой была произведена оценка наихудшего случая передаваемых в сети задержек и задержек потоков. Для получения суммарной кривой поступления, для потоков, конкурентов на выходном порту, была применена оценка критического графика.

Литература

1. Воробьев С. TSN – синхронизируемые по времени сети. Часть 1 // Современные технологии автоматизации. 2020. № 1. С. 18–22.
2. Воробьев С. TSN – синхронизируемые по времени сети. Часть 2 // Современные технологии автоматизации. 2020. № 2. С. 22–27.
3. Стандартизация синхронизируемых по времени сетей TSN / А.В. Росляков [и др.] // Стандарты и качество. 2021. № 4. С. 48–53.
4. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks-Bridges and Bridged Networks. URL: https://standards.ieee.org/standard/802_1Q-2018.html (дата обращения: 08.11.2023).
5. Бина Ш., Брукнер Д., Васина А.С. OPC UA TSN как технология для обеспечения связи на всех уровнях автоматизации // Автоматизация в промышленности. 2019. № 2. С. 26–34.
6. Improving the worst-case delay analysis of an AFDX network using an optimized trajectory approach. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5524098> (дата обращения: 01.11.2023).
7. Performance impact of the interactions between time-triggered and rate-constrained transmissions in TTEthernet. URL: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01255939> (дата обращения: 03.11.2023).
8. Timing analysis of TDMA-based networks using network calculus and integer linear programming. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/703363> (дата обращения: 05.11.2023).
9. Timing analysis of AVB traffic in TSN networks using network calculus. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8430063> (дата обращения: 08.11.2023).
10. Formal worst-case timing analysis of Ethernet TSN's time-aware and peristaltic shapers. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7385584> (дата обращения: 09.11.2023).
11. A calculus for network delay. I. Network elements in Isolation. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/61109> (дата обращения: 07.11.2023).
12. A new Solution for Industrial Communication / D. Bruckner [et al.]. URL: <https://www.moxa.com/Moxa/files/66/6669d232-4227-440a-9ddf-477e70b11780.pdf> (дата обращения: 10.03.2021).

Получено 09.11.2023

Сударева Мария Евгеньевна, ассистент передовой инженерной аэрокосмической школы Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева. 443086, Российская Федерация, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34. Тел. +7 937 171-12-01. E-mail: masha_sudareva@mail.ru

Яшин Владимир Николаевич, к.т.н., доцент кафедры информационных технологий Самарского государственного технического университета. 443100, Российская Федерация, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244. Тел. +7 987 913-40-52. E-mail: vlyashin@yandex.ru

ANALYSIS OF BOUNDARY LATENCIES IN THE TSN ETHERNET NETWORK

Sudareva M.E.¹, Yashin V.N.²

¹*Samara National Research University, Samara, Russian Federation*

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

E-mail: masha_sudareva@mail.ru

The article describes analysis of boundary latencies in the TSN Ethernet network using deterministic analysis, based on network calculations. Today Internet networks have successfully reduced end-to-end operational latencies to tens of milliseconds only, but modern applications require even lower latencies. It is so called ultrashort or edge latency (ULL), that fulfil requirements of modern applications. Latencies are very critical factor in such area as telemedicine because telesurgery needs almost

real-time network connection. The article provides results of TSN Ethernet network analysis in the form of a graph.

Keywords: *TSN, deterministic analysis, network calculus, end-to-end delay, boundary delays, arrival curve, service curve*

DOI: 10.18469/ikt.2023.21.2.06

Sudareva Maria Evgenievna, Samara National Research University, 34, Moskovskoe shosse, Samara, 443086, Russian Federation; Assistant Advanced Aerospace Engineering School. Tel. +7 937 171-12-01. E-mail: masha_sudareva@mail.ru

Yashin Vladimir Nikolaevich, Samara State Technical University, 244, Molodogvardeyskaya Street, Samara, 443100, Russian Federation; Associate Professor of Information Technologies Department, PhD in Technical Science. Tel. +7 987 913-40-52. E-mail: vlyashin@yandex.ru

References

1. Vorobiev S. TSN – time synchronized network. Part 1. *Sovremennye tehnologii avtomatizatsii*, 2020, no. 1, pp. 18–22. (In Russ.)
2. Vorobiev S. TSN – time synchronized network. Part 2. *Sovremennye tehnologii avtomatizatsii*, 2020, no. 2, pp. 22–27. (In Russ.)
3. Roslyakov A.V. et al. Time sensitive networking standardization. *Standarty i kachestvo*, 2021, no. 4, pp. 48–53. (In Russ.)
4. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks-Bridges and Bridged Networks. URL: https://standards.ieee.org/standard/802_1Q-2018.html (accessed: 08.11.2023).
5. Bina Sh., Bruckner D., Vasina A.S. OPC UA TSN as a technology for communication at all levels of automation. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti*, 2019, no. 2, pp. 26–34. (In Russ.)
6. Improving the worst-case delay analysis of an AFDX network using an optimized trajectory approach. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5524098> (accessed: 01.11.2023).
7. Performance impact of the interactions between time-triggered and rate-constrained transmissions in TTEthernet. URL: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01255939> (accessed: 03.11.2023).
8. Timing analysis of TDMA-based networks using network calculus and integer linear programming. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/703363> (accessed: 05.11.2023).
9. Timing analysis of AVB traffic in TSN networks using network calculus. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8430063> (accessed: 08.11.2023).
10. Formal worst-case timing analysis of Ethernet TSN's time-aware and peristaltic shapers. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7385584> (accessed: 09.11.2023).
11. A calculus for network delay. I. Network elements in Isolation. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/61109> (accessed: 07.11.2023).
12. Bruckner D. et al. A new Solution for Industrial Communication. URL: <https://www.moxa.com/Moxa/files/66/6669d232-4227-440a-9ddf-477e70b11780.pdf> (accessed: 10.03.2021).

Received 09.11.2023

НОВЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 004.896

ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ АЛГОРИТМОВ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ПОДСЧЕТА ОБЪЕКТОВ НА ИЗОБРАЖЕНИИ

Альгашев Г.А., Солдатова О.П.

*Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, РФ
E-mail: algashev@live.com*

Данная статья посвящена исследованию архитектур сверточных нейронных сетей для решения задачи подсчета объектов на изображении. В настоящее время для решения этой задачи применяют набирающие все большую популярность методы, использующие регрессию. В работе для решения задачи подсчета объектов как задачи с использованием регрессии были применены модификации эталонных сверточных нейронных сетей AlexNet, VGG16 и ResNet 50, которые предназначены для классификации изображений. Модификация заключалась в замене второй части нейронной сети, которая классифицирует изображения, на один полносвязный слой, состоящий из одного нейрона без функции активации. В экспериментах измененные архитектуры эталонных сверточных сетей инициализировались двумя способами: с помощью случайной инициализации весов и с помощью заранее подготовленных весов, обученных на наборе данных ImageNet. Представлены результаты экспериментов, в которых подтверждается работоспособность предложенных моделей и применения метода нейропластичности для решения задачи с использованием регрессии. В качестве данных для обучения и тестирования применялась база изображений бактериальных клеток.

Ключевые слова: сверточная нейронная сеть, регрессия, инициализация весов, нейропластичность, подсчет объектов, компьютерное зрение, анализ изображения

Введение

Задача подсчета однотипных объектов на изображении является одной из задач компьютерного зрения. Решение этой задачи необходимо во многих сферах деятельности, например, для подсчета клеток крови на микроскопических изображениях, мониторинга потока людей в системах видеонаблюдения или оценки лесного покрова на аэрофотоснимках. Для решения этих задач часто используют ручной подсчет объектов.

Для автоматизации решения задачи подсчета объектов на изображении используют алгоритмы сегментации изображения [1–5] и алгоритмы детектирования объектов на изображении [6–10]. Однако эти алгоритмы показывают низкую эффективность в случаях, если объекты на изображении соприкасаются или пересекаются, расположены на разном расстоянии от предмета съемки, размыты или имеют малый размер.

В настоящее время большую популярность набирают методы, в которых задача подсчета объектов представляется как задача регрессии. В этих методах строится регрессионная функция зависимости количества объектов в некоторой области изображения от визуальных признаков объектов в данной области. К данным методам относятся алгоритмы, выделяющие структурные признаки [11; 12], градиентные признаки [13; 14; 15] и текстурные признаки [16; 17].

Как правило, для решения задачи регрессии используют нейронные сети, а именно, многослойный перцептрон или сеть радиально-базисных функций. Эти сети хорошо работают, если входные данные представляют собой векторы признаков, которые являются упрощенными представлениями реальных данных и имеют невысокую размерность. Однако не все данные можно представить при помощи упрощенного вектора признаков. При работе с изображениями определение наиболее значимых характеристик является слож-

ной задачей, которую не всегда удается решить. Поэтому для работы с изображениями все чаще используют сверточные нейронные сети [18; 19; 20], которые для решения поставленной задачи анализируют изображения целиком.

Обзор современных методов подсчета объектов на изображении

Существующие алгоритмы, которые решают задачу подсчета объектов на изображении, можно разделить на следующие категории:

- алгоритмы, использующие сегментацию изображения;
- алгоритмы, использующие детектирование объектов на изображении;
- алгоритмы, использующие регрессию.

Алгоритмы, использующие сегментацию изображения, являются самыми распространенными и применяются чаще других для подсчета объектов [1–5]. Идея данных алгоритмов заключается в решении задачи сегментации областей интереса на изображении и их дальнейшего анализа.

Анализ изображений состоит из трех этапов:

1. Сегментация областей изображения, представляющих интерес для анализа.
2. Локализация отдельных объектов на изображении.
3. Оценка количества объектов.

В качестве недостатков данных алгоритмов можно выделить недостаточно высокую эффективность оценки в случае, если объекты на изображении соприкасаются или пересекаются друг с другом, расположены на разном расстоянии от предмета съемки, размыты или имеют малый размер.

Алгоритмы детектирования объектов, используют визуальный детектор объектов, который локализует отдельные объекты на изображении [8–12]. После локализации всех объектов на изображении не составляет труда посчитать их количество. Такие методы ориен-

тированы на изображения, где объекты удалены друг от друга и являются однородными. Проблемы алгоритмов детектирования аналогичны проблемам алгоритмов сегментации.

При подсчете количества объектов с использованием методов регрессии [13–19] задача локализации объектов на изображении не решается. Вместо этого алгоритмы анализируют изображение на основе его глобальных характеристик, в результате чего система обучается выдавать оценку количества объектов. Стоит отметить, что методы регрессии не используют для обучения информацию о местонахождении объектов, а используют только информацию об их количестве. Для обучения таких систем требуется большое количество заранее подготовленных обучающих данных.

Модели сверточных нейронных сетей для решения задачи регрессии

Для решения задачи подсчета объектов на изображении как задачи регрессии в работе использовались известные архитектуры сверточных нейронных сетей [20], которые предназначены для обработки и анализа изображений.

Для разработки собственной архитектуры нейронной сети, подбора параметров сети и ее обучения может потребоваться много времени и вычислительных ресурсов. Кроме того, при таком подходе нельзя использовать эталонные модели, обученные на одинаковых стандартных наборах изображений, и как следствие, сравнение полученных результатов затруднено. Поэтому чаще всего для решения задач используют эталонные модели сетей с натренированными весами, которые затем модифицируют для решения конкретной задачи. Это позволяет сэкономить время на настройку весов сети, так как эталонная модель предварительно обучена и во время повторного обучения на новом наборе данных, веса будут только незначительно корректироваться. При необходимости, данные модели можно обучать с нуля случайно инициализированными весами, не используя натренированные веса.

Для решения задачи в работе были использованы три эталонных архитектуры сверточных нейронных сетей, а именно сеть AlexNet [21], VGG16 [22] и ResNet50 [23]. Использование этих сетей обусловлено тем, что модели можно инициализировать весами, обученными на одинаковом наборе данных ImageNet, для решения поставленной задачи. Данная особенность позволит сравнивать результаты обучения моделей в случае их инициализации натренированными весами.

Представленные эталонные модели в неизменном виде не могут быть использованы для решения задачи регрессии. Архитектура каждой модели сети состоит из двух частей:

1. Первая часть выделяет характерные признаки изображений и состоит из сверточных и подвыборочных слоев.

2. Вторая часть выполняет классификацию изображения по выделенным на предыдущих слоях признакам, и состоит из полносвязных слоев. Последний полносвязный слой использует функцию активации SoftMax [24].

Для решения новой задачи регрессии были изменены вторые части всех трех моделей, в которых все полносвязные слои были заменены на один полносвязный слой нейронов без функции активации. Этот полносвязный слой будет состоять только из одного нейрона, который будет выдавать на выходе оценку количества объектов на изображении.

Измененные архитектуры сверточных сетей AlexNet, VGG16 и ResNet50 представлены на рисунке 1.

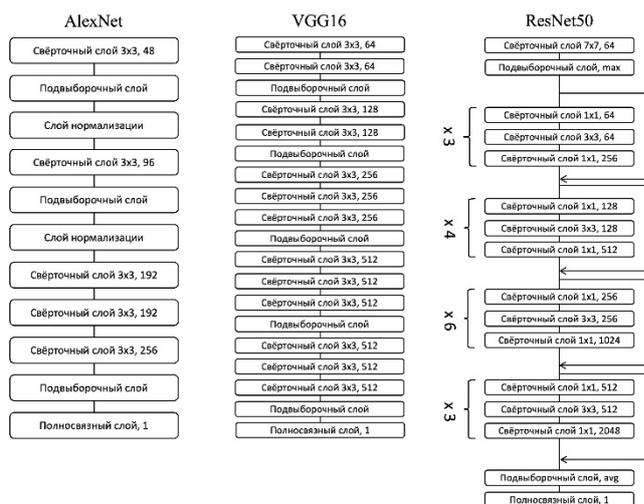


Рисунок 1. Архитектуры сетей AlexNet, VGG16 и ResNet50 для решения задачи регрессии

Данные для обучения и тестирования

Для решения задачи подсчета объектов на изображениях в качестве данных для обучения и тестирования была взята база изображений бактериальных клеток [25]. Набор состоит из изображений, на которых содержатся бактериальные клетки, подсвеченные с помощью люминесцентной микроскопии (рисунок 2а), и изображений, которые являются аннотациями к исходным данным (рисунок 2б). На аннотациях выделены центры бактериальных клеток исходных изображений.

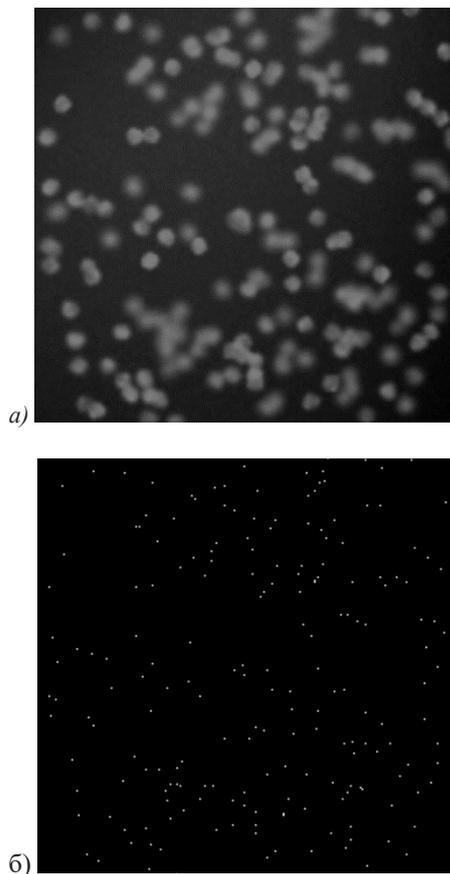


Рисунок 2. Пример изображения, содержащего бактериальные клетки, и аннотация к изображению

Набор данных состоит из 200 исходных изображений и 200 аннотаций к ним. Каждое изображение имеет размер 256 на 256 пикселей и является цветным. В исходных изображениях может содержаться от 74 до 317 объектов.

Анализировать исходные изображения целиком сложно из-за их высокого разрешения, поэтому исходные изображения и аннотации были разделены на фрагменты размером 32 на 32 пикселей, которые и подавались на вход сети.

Выбор размера фрагментов изображений обусловлен следующими особенностями. При увеличении размера фрагментов время обучения сверточных нейронных сетей и значение погрешности будет увеличиваться. При уменьшении размера фрагментов время обучения и значение погрешности будет уменьшаться. Но в таком случае для обработки исходного изображения потребуется посылать большее количество фрагментов, что увеличит время анализа изображения.

Обучение моделей сетей происходило в облачном сервисе Google Colaboratory, который имеет следующие ограничения:

- использование только одного графического процессора для обучения сетей;
- объем доступной видеопамати изменяется со временем и ограничен 12 Гб;

- максимальное время сеанса не превышает 12 часов;

- высокая вероятность аварийного завершения сеанса обучения при превышении лимита памяти или наличии нестабильного интернет-соединения.

Наличие данных ограничений не позволяет производить длительные и высокопроизводительные вычисления для обучения моделей сетей.

На основе исходной базы данных были сгенерированы 10 000 фрагментов изображений, содержащих бактериальные клетки, и 10 000 фрагментов аннотаций к ним. Для проведения экспериментов использовано 9 000 фрагментов для обучения, 500 фрагментов для промежуточной проверки работы сети во время обучения и 500 изображений для тестирования.

Перед использованием в сети фрагменты аннотаций были преобразованы в числовой вектор, в котором записано количество объектов для каждого фрагмента изображения путем суммирования выделенных пикселей. Фрагменты изображений были нормализованы перед подачей на вход сети.

Нормализация входных данных заключалась в делении значения каждого пикселя на 255 для каждого канала RGB, с целью преобразования данных в диапазон от 0 до 1.

Обучение моделей сверточных сетей и анализ результатов экспериментов

Для разработки и обучения программной реализации моделей сверточных нейронных сетей был использован язык высокого уровня Python и нейросетевые библиотеки TensorFlow и Keras, которые предназначены для работы с данными и нейронными сетями.

Для исследования были проведены две серии экспериментов:

1. Весасверточных слоев инициализировались случайным образом, и модели обучались с нуля.
2. Веса сверточных слоев инициализировались тренированными весами, обученными на наборе данных ImageNet, и происходило дообучение сетей.

В качестве алгоритма обучения использовался метод адаптивной инерции (Adam) [26]. Метод вычисляет адаптивные скорости обучения для каждого веса сети из оценок первого и второго моментов градиентов. Алгоритм вычисляет экспоненциальную скользящую среднюю градиента и квадрата градиента, а параметры β_1 и β_2 управляют скоростью затухания скользящих средних.

Правила перерасчета метода:

$$\begin{aligned}
 m_t &= \beta_1 m_{t-1} + (1 - \beta_1) \Delta L_t(w_{t-1}), \\
 v_t &= \beta_2 g_{t-1} + (1 - \beta_2) \Delta L_t(w_{t-1}), \\
 \hat{m}_t &= \frac{m_t}{1 - \beta_1^t}, \\
 \hat{v}_t &= \frac{v_t}{1 - \beta_2^t}, \\
 w_t &= w_{t-1} = \frac{\eta \hat{m}_t}{\sqrt{\hat{v}_t + \varepsilon}},
 \end{aligned}$$

где L – функция погрешности, m_t – оценка первого момента, а v_t – оценка второго момента. Скорректированные оценки \hat{m}_t и \hat{v}_t используются для предотвращения долгого накопления m_t и v_t .

Метод имеет следующие задаваемые параметры:

- η – коэффициент скорости обучения;
- β_1 – коэффициент - показатель экспоненциальной скорости затухания для первого момента;
- β_2 – коэффициент - показатель экспоненциального спада для оценок второго момента;
- ε – коэффициент сглаживания, для предотвращения деления на ноль.

Для обучения моделей сетей были заданы параметры $\eta = 0,0001$, $\beta_1 = 0,9$, $\beta_2 = 0,999$, $\varepsilon = 0,0000001$.

В качестве функции погрешности используется евклидово расстояние и средняя квадратическая ошибка.

Евклидово расстояние представляет собой геометрическое расстояние в многомерном пространстве:

$$L = \sqrt{\sum_i^n (y_i - y'_i)^2},$$

где n – количество нейронов в выходном слое сети, y – ожидаемое значение выходного сигнала нейрона, y' – фактическое значение выходного сигнала нейрона.

Средняя квадратическая ошибка – оценка среднего квадратичного отклонения, которая вычисляется по формуле:

$$L = \frac{1}{n} \sum_i^n (y_i - y'_i)^2.$$

Использование этих функций погрешностей обусловлено тем, что они являются самыми распространенными при решении задачи регрессии.

В таблице 1 и таблице 2 приведены значения погрешностей обучения и обобщения сетей AlexNet, VGG16 и ResNet для каждой 10-ой эпохи обучения в первой серии экспериментов. По-

грешность обучения рассчитывалась на основе данных из обучающей выборки, а погрешность обобщения рассчитывалась на основе данных для промежуточной проверки, которые не участвовали в обучении сетей.

Анализ результатов экспериментов показал, что значение погрешности обучения во всех трех моделях уменьшалось в процессе обучения и к концу обучения сетей достигло значения 0,1045 (0,005) для сети AlexNet, значения 0,1442 (0,001) для сети VGG16 и значения 0,2280 (0,0026) для сети ResNet50. Значение погрешности обобщения напротив, уменьшалось неравномерно и скачкообразно и к концу обучения достигло значения 0,3844 (0,0074) для сети AlexNet, значения 0,3117 (0,0049) для сети VGG16 и значения 0,4489 (0,0101) для сети ResNet50.

На тестовой выборке модели показали значение погрешности 0,4313 (0,0093) для сети AlexNet, значение 0,2378 (0,0028) для сети VGG16 и значение 0,4491 (0,0101) для сети ResNet50. По этим данным можно сделать вывод, что сеть VGG16 показала лучшие результаты на выборке для промежуточной проверки и на тестовой выборке.

Для второй серии экспериментов веса моделей инициализировались подготовленными весами, которые были получены путем обучения моделей на наборе данных ImageNet [27]. Идея использовать подготовленные веса в сети основана на свойстве нейропластичности сверточных сетей. Под нейропластичностью понимают использование подготовленных весов для дообучения сети на новом наборе данных, таким образом, модели изменяют свои веса незначительно для решения новой задачи [28; 29].

В таблице 3 и таблице 4 приведены значения погрешностей обучения и обобщения сетей AlexNet, VGG16 и ResNet для каждой 10-ой эпохи обучения во второй серии экспериментов.

Аналогично первой серии экспериментов, значение погрешности обучения во всех моделях равномерно уменьшалось во время обучения, а значение погрешности обобщения уменьшалось неравномерно. Отсюда можно сделать вывод, что характер изменения погрешностей во всех моделях не изменился.

К завершению обучения значения погрешности обучения и погрешности обобщения составляли 0,1129 (0,0006) и 0,2607 (0,0034) соответственно, для сети AlexNet, значения 0,1198 (0,0007) и 0,1943 (0,0019) для сети VGG16, и значения 0,1346 (0,0009) и 0,2731 (0,0037) для сети ResNet50. На тестовой выборке значение погрешности составляет 0,2913 (0,0042) для сети

Таблица. 1. Результаты обучения сверточных моделей при случайной инициализации весов и использовании в качестве функции погрешности евклидового расстояния

Номер эпохи	AlexNet		VGG16		ResNet50	
	Погрешность обучения	Погрешность обобщения	Погрешность обучения	Погрешность обобщения	Погрешность обучения	Погрешность обобщения
10	0,3461	0,3892	0,3832	0,5003	0,8559	0,9491
20	0,2412	0,4329	0,2868	0,3862	0,7758	5,7209
30	0,1827	0,3323	0,2220	0,5605	0,7582	0,7123
40	0,1583	0,5207	0,1994	0,3665	0,5825	1,2585
50	0,1461	0,3086	0,1905	0,5107	0,3982	0,3027
60	0,1322	0,3255	0,1704	0,6531	0,4080	1,4437
70	0,1234	0,3956	0,1857	0,6504	0,3173	0,5217
80	0,1125	0,5153	0,1612	0,2137	0,2683	0,3210
90	0,1073	0,3841	0,1535	0,4938	0,2153	0,3861
100	0,1045	0,3844	0,1442	0,3117	0,2280	0,4489

Таблица. 2. Результаты обучения сверточных моделей при случайной инициализации весов и использовании в качестве функции погрешности средней квадратичной ошибки

Номер эпохи	AlexNet		VGG16		ResNet50	
	Погрешность обучения	Погрешность обобщения	Погрешность обучения	Погрешность обобщения	Погрешность обучения	Погрешность обобщения
10	0,0060	0,0076	0,0073	0,0125	0,0366	0,0450
20	0,2412	0,0094	0,0041	0,0075	0,0301	1,6364
30	0,0017	0,0055	0,0025	0,0157	0,0287	0,0254
40	0,0013	0,0136	0,0020	0,0067	0,0170	0,0792
50	0,0011	0,0048	0,0018	0,0130	0,0079	0,0046
60	0,0009	0,0053	0,0015	0,0213	0,0083	0,1042
70	0,0008	0,0078	0,0017	0,0212	0,0050	0,0136
80	0,0006	0,0133	0,0013	0,0023	0,0036	0,0052
90	0,0006	0,0074	0,0012	0,0122	0,0023	0,0075
100	0,0005	0,0074	0,0010	0,0049	0,0026	0,0101

Таблица. 3. Результаты обучения сверточных моделей при инициализации сетей подготовленными весами и использовании в качестве функции погрешности евклидового расстояния

Номер эпохи	AlexNet		VGG16		ResNet50	
	Погрешность обучения	Погрешность обобщения	Погрешность обучения	Погрешность обобщения	Погрешность обучения	Погрешность обобщения
10	0,3724	0,3958	0,3731	0,3641	0,6255	0,7265
20	0,2629	0,4676	0,2967	0,2459	0,6379	0,6914
30	0,2008	0,4127	0,2644	0,2600	0,4918	0,9943
40	0,1738	0,3631	0,2490	0,4613	0,3812	0,4514
50	0,1535	0,2465	0,1869	0,5286	0,3298	0,4314
60	0,1438	0,4144	0,1773	0,3217	0,2823	0,4678
70	0,1322	0,4340	0,1965	0,2679	0,2271	0,3874
80	0,1246	0,4773	0,1595	0,6322	0,2037	0,4748
90	0,1199	0,4488	0,1436	0,3281	0,1702	0,3301
100	0,1129	0,2607	0,1198	0,1943	0,1346	0,2731

Таблица. 4. Результаты обучения сверточных моделей при инициализации сетей подготовленными весами и использовании в качестве функции погрешности средней квадратичной ошибки

Номер эпохи	AlexNet		VGG16		ResNet50	
	Погрешность обучения	Погрешность обобщения	Погрешность обучения	Погрешность обобщения	Погрешность обучения	Погрешность обобщения
10	0,0069	0,0078	0,0070	0,0066	0,0196	0,0264
20	0,0035	0,0109	0,0044	0,0030	0,0203	0,0239
30	0,0020	0,0085	0,0035	0,0034	0,0121	0,0494
40	0,0015	0,0066	0,0031	0,0106	0,0073	0,0102
50	0,0012	0,0030	0,0017	0,0140	0,0054	0,0093
60	0,0010	0,0086	0,0016	0,0052	0,0040	0,0109
70	0,0009	0,0094	0,0019	0,0036	0,0026	0,0075
80	0,0008	0,0114	0,0013	0,0200	0,0021	0,0113
90	0,0007	0,0101	0,0010	0,0054	0,0014	0,0054
100	0,0006	0,0034	0,0007	0,0019	0,0009	0,0037

AlexNet, 0,1489 (0,0011) для сети VGG16 и 0,3923 (0,0076) для сети ResNet50.

Заключение

Предложенные модификации архитектур сверточных нейронных сетей позволили эффективно решить задачу подсчета объектов на изображении как задачу регрессии. По результатам анализа экспериментов в первой и второй серии, можно сделать вывод, что все модели сетей показали лучший результат на данных для промежуточной проверки и на тестовых данных при начальной инициализации сетей подготовленными весами. Экспериментально было показано, что применение свойства нейропластичности в сверточных сетях позволяет уменьшить значение погрешности при решении задачи регрессии.

В результате проведения исследований выяснилось, что самое большое значение погрешности тестирования 0,4491 (0,0101), показала модель сети ResNet50, обученная со случайно инициализированными весовыми коэффициентами.

Для решения поставленной задачи подсчета однотипных объектов на изображении лучшей является модификация модели нейронной сети VGG16 для решения задачи регрессии, инициализируемая весами, подготовленными для решения задачи классификации на наборе ImageNet. Такая модель показала значение погрешности на тестовых данных 0,1489 (0,0011), что в 3 раза меньше наихудшего результата сети ResNet50.

Литература

1. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005. 1072 с.
2. Segmentation and Classification of SAR Data with Co-Occurrence Matrix for Texture Features / N.G. Kasapoglu [et al.] // Proceedings EUSAR 2002. Germany: Cologne, 2002. P. 717–720.
3. Fang S., Wen H., Shiyi M. Classification of SAR images Based on Simplified Segmentation // Proceedings EUSAR 2002. Germany: Cologne, 2002. P. 705–708.
4. Миронов Б.М., Малов А.Н. Сегментация изображений кластерным методом и алгоритмом случайных скачков: сравнительный анализ // Компьютерная оптика. 2010. Т. 34, №1. С. 132–137.
5. Белим С.В., Ларионов С.Б. Алгоритм сегментации изображений, основанный на поиске сообществ на графах // Компьютерная оптика. 2016. Т. 40, № 6. С. 904–910.
6. Shneier M. Road sign detection and recognition // Proceedings IEEE Computer Society International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2005. P. 215–222.
7. Распознавание тест-объектов на тепловизионных изображениях / А.В. Мингалев [и др.] // Компьютерная оптика. 2019. Т. 43, № 3. С. 402–411.
8. Viola P., Jones M. Robust Real-time Object Detection // International Journal of Computer Vision. 2001. no. 57(2). P. 137–154.
9. Viola P., Jones M. Rapid object detection using a boosted cascade of simple features // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2001. Vol. 1. P. 511–518.
10. Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation / R. Girshick [et al.] // 2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2014. P. 580–587.
11. Estimating pedestrian counts in groups / P. Kilambi [et al.] // Computer Vision and Image Understanding. 2008. Vol. 110. P. 43–59.
12. Crowd counting using group tracked and local features / D. Ryan [et al.] // 7th IEEE International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance. 2010. P. 218–224.
13. Estimating crowd density with Minlowski fractal dimension / A.N. Marana [et al.] // 1999 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. 1999. Vol. 6. P. 3521–3524.
14. Feature mining for localized crowd counting / K. Chen [et al.] // Proceedings of British Machine Conference. 2012. Vol. 21. P. 1–11.
15. Ma W., Huang L., Liu C. Crowd density analysis using co-occurrence texture features // Proceedings of International Conference on Computer Sciences and Convergence Information Technologies. 2010. P. 170–175.
16. Automatic estimation of crowd density using texture / A.N. Marana [et al.] // Safety Science. 1998. Vol. 28. P. 165–175.
17. Rahmalan H., Nixon M., Carter J. On crowd density estimation for surveillance // The Institution of Engineering and Technology Conference on Crime and Security. 2006. P. 540–545.
18. Backpropagation Applied to Handwritten Zip Code Recognition / Y. LeCun [et al.] // Neural Computation. 1989. Vol. 1, no. 4. P. 541–551.
19. Cell Counting by Regression Using Convolutional Neural Network / Y. Xue [et al.]. Springer International Publishing, 2016. 17 p.
20. Deep Spatial Regression Model for Image Crowd Counting / H. Yao [et al.]. URL: <https://arxiv.org/pdf/1710.09757.pdf> (дата обращения: 26.08.2020).

21. Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G.E. Image Net classification with deep convolution neural networks // Advances in neural information processing systems (NIPS). 2012. P. 1097–1105.
22. Accelerating very deep convolutional networks for classification and detection / X. Zhang [et al.] // IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. 2016. no. 38. P. 1943–1955.
23. Deep Residual Learning for Image Recognition / K. He [et al.] // 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2016. P. 770–778.
24. Bishop C.M. Pattern Recognition and Machine Learning (Information Science and Statistics). Springer, 2006. 738 p.
25. Lempitsky V., Zisserman A. Learning to count objects in images // Neural Information Processing Systems Foundation. 2010. P. 1324–1332.
26. Kingma D.P., Ba J. Adam: A Method for Stochastic Optimization // International Conference on Learning Representations. 2015. P. 1–13.
27. Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G.E. ImageNet classification with deep convolution neural networks // Advances in neural information processing systems. 2012. P. 1097–1105.
28. Альгашев Г.А., Солдатова О.П. Нейропластичность сверточных нейронных сетей // Перспективные информационные технологии (ПИТ-2018): материалы Международной научно-технической конференции. Самара: СНЦ РАН, 2018. С. 385–389.
29. Альгашев Г.А., Солдатова О.П. Исследование эффективности использования свойства нейропластичности в сверточных сетях // Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ-2019): материалы V Международной конференции и молодежной школы. Самара: Новая техника, 2019. С. 711–720.

Получено 07.11.2023

Альгашев Геннадий Андреевич, ассистент кафедры информационных систем и технологий (ИСТ) Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева (Самарский университет). 443086, Российская Федерация, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34. Тел. +7 927 722-48-73. E-mail: algashev@live.com

Солдатова Ольга Петровна, к.т.н., доцент кафедры ИСТ Самарского университета. 443086, Российская Федерация, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34. Тел. +7 927 654-29-33. E-mail: op-soldatova@yandex.ru

APPLICATION OF MODERN COMPUTER VISION ALGORITHMS TO MANAGE WITH THE COUNTING OF IMAGE OBJECTS

Algashev G.A., Soldatova O.P.

Samara National Research University, Samara, Russian Federation

E-mail: algashev@live.com

This article is devoted to the research of convolutional neural network architectures in counting objects in an image. Currently, methods using regression are gaining popularity. In this article in order to solve an object counting task using regression method, modifications of the reference convolutional neural networks AlexNet, VGG16, and ResNet 50, which were developed for image classification, were used. Modification presented by replacing the second part of the neural network, which classifies images, with one fully connected layer, consisting of one neuron without activating function. In experiments, modified architectures of the reference convolutional networks were initialized as follows: using random initialization of the weights and using pretrained weights trained on the ImageNet dataset. The results of experiments, which confirm the performance of the proposed models and the use of the neuroplasticity method to solve the problem using regression are presented. The database of images of bacterial cells was used as training and testing material.

Keywords: *convolutional neural network, regression, initialization of weights, neuroplasticity, object counting, computer vision, image analysis*

DOI: 10.18469/ikt.2023.21.2.07

Algashev Gennady Andreevich, Samara National Research University, 34, Moskovskoe shosse,

Samara, 443086, Russian Federation; Teacher of Information Systems and Technologies Department. Tel. +7 927 722-48-73. E-mail: algashev@live.com

Soldatova Olga Petrovna, Samara National Research University, 34, Moskovskoe shosse, Samara, 443086, Russian Federation; Associated Professor of Information Systems and Technologies Department, PhD in Technical Science. Tel. +7 927 654-29-33. E-mail: op-soldatova@yandex.ru

References

1. Gonzalez R. *Digital image processing*. Moscow: Tekhnosfera, 2005, 1072 p.
2. Kasapoglu N.G. et al. Segmentation and Classification of SAR Data with Co-Occurance Matrix for Texture Features. *Proceedings EUSAR 2002*, Germany: Cologue, 2002, pp. 717–720.
3. Fang S., Wen H., Shiyi M. Classification of SAR images Based on Simplified Segmentation. *Proceedings EUSAR 2002*, Germany: Cologue, 2002, pp. 705–708.
4. Mironov B.M., Malov A.N. Image segmentation by the cluster method and the random hopping algorithm: a comparative analysis. *Komp'yuternaya optika*, 2010, vol. 34, no. 1, pp. 132–137. (In Russ.)
5. Belim S.V., Larionov S.V. An algorithm of image segmentation based on community detection in graphs. *Komp'yuternaya optika*, 2016, vol. 40, no. 6, pp. 904–910. (In Russ.)
6. Shneier M. Road sign detection and recognition. *Proceedings IEEE Computer Society International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2005, pp. 215–222.
7. Mingalev A.V. et al. Test-object recognition in thermal images. *Komp'yuternaya optika*, 2019, vol. 43, no. 3, pp. 402–411. (In Russ.)
8. Viola P., Jones M. Robust Real-time Object Detection. *International Journal of Computer Vision*, 2001, no. 57(2), pp. 137–154.
9. Viola P., Jones M. Rapid object detection using a boosted cascade of simple features. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2001, vol. 1, pp. 511–518.
10. Girshick R. et al. Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation. *2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2014, pp. 580–587.
11. Kilambi P. et al. Estimating pedestrian counts in groups. *Computer Vision and Image Understanding*, 2008, vol. 110, pp. 43–59.
12. Ryan D. et al. Crowd counting using group tracked and local features. *7th IEEE International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance*, 2010, pp. 218–224.
13. Marana A.N. et al. Estimating crowd density with Minlowski fractal dimension. *1999 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1999, vol. 6, pp. 3521–3524.
14. Chen K. et al. Feature mining for localized crowd counting. *Proceedings of British Machine Conference*, 2012, vol. 21, pp. 1–11.
15. Ma W., Huang L., Liu C. Crowd density analysis using co-occurrence texture features. *Proceedings of International Conference on Computer Sciences and Convergence Information Technologies*, 2010, pp. 170–175.
16. Marana A.N. et al. Automatic estimation of crowd density using texture. *Safety Science*, 1998, vol. 28, pp. 165–175.
17. Rahmalan H., Nixon M., Carter J. On crowd density estimation for surveillance. *The Institution of Engineering and Technology Conference on Crime and Security*, 2006, pp. 540–545.
18. LeCun Y. et al. Backpropagation Appiled to Handwritten Zip Code Recognition. *Neural Computation*, 1989, vol. 1, no. 4, pp. 541–551.
19. Xue Y. et al. *Cell Counting by Regression Using Convolutional Neural Network*. Springer International Publishing, 2016. 17 p.
20. Yao H. et al. Deep Spatial Regression Model for Image Crowd Counting. URL: <https://arxiv.org/pdf/1710.09757.pdf> (accessed: 26.08.2020).
21. Krizhevsky A., Sutskever I, Hinton G.E. Image Net classification with deep convolution neural networks. *Advances in neural information processing systems (NIPS)*, 2012, pp. 1097–1105.

22. Zhang X. et al. Accelerating very deep convolutional networks for classification and detection. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 2016, no. 38, pp. 1943–1955.
23. He K. et al. Deep Residual Learning for Image Recognition. *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2016, pp. 770–778.
24. Bishop C.M. *Pattern Recognition and Machine Learning (Information Science and Statistics)*. Springer, 2006, 738 p.
25. Lempitsky V., Zisserman A. Learning to count objects in images. *Neural Information Processing Systems Foundation*, 2010, pp. 1324–1332.
26. Kingma D.P., Ba J. Adam: A Method for Stochastic Optimization. *International Conference on Learning Representations*, 2015, pp. 1–13.
27. Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G.E. ImageNet classification with deep convolution neural networks. *Advances in neural information processing systems*, 2012, pp. 1097–1105.
28. Algashev G.A., Soldatova O.P. Neuroplasticity of convolutional neural networks. *Perspektivnye informacionnye tekhnologii (PIT-2018): materialy Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii*, Samara: SNTs RAN, 2018, pp. 385–389. (In Russ.)
29. Algashev G.A., Soldatova O.P. Study of the effectiveness of using the property of neuroplasticity in convolutional. *Informacionnye tekhnologii i nanotekhnologii (ITNT-2019): materialy V Mezhdunarodnoj konferencii i molodezhnoj shkoly*. Samara: Novaya tekhnika, 2019, pp. 711–720. (In Russ.)

Received 07.11.2023

УДК 004.942

ИТЕРАТИВНЫЕ АДАПТАЦИОННЫЕ АЛГОРИТМЫ В МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫХ ЗАДАЧАХ

Бельгер И.С., Солдатова О.П.

*Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, РФ
E-mail: irina.belger@mail.ru, op-soldatova@yandex.ru*

Данная статья рассматривает использование итеративных адаптационных алгоритмов для решения задачи определения места измерения комплекса интима-медиа сонной артерии. Приведена постановка многокритериальной задачи принятия решений, на основании которой происходит определение корректного критерия для выбора и успешного распознавания требуемого объекта на ультразвуковом снимке. В работе рассматриваются принципы построения каскадных классификаторов, применение каскадного классификатора Хаара и каскадного классификатора LBP (Local Binary Patterns), в качестве основы для которых использованы примитивы Хаара и локальные бинарные шаблоны. Приведены результаты экспериментальных исследований эффективности использования разных алгоритмов бустинга для решения данной задачи. Лучшие результаты показал каскадный классификатор Хаара, построенный с помощью итеративного адаптационного алгоритма, который успешнее справляется с решением многокритериальной задачи на данной обучающей выборке и определяет наиболее подходящие участки для измерения толщины комплекса интима-медиа общей сонной артерии.

Ключевые слова: *адаптационные алгоритмы, бустинг, многокритериальная задача, каскадный классификатор, каскад Хаара, каскад LBP, признаки Хаара, Adaboost, локальные бинарные паттерны*

Введение

Необходимость распознавания изображений возникает во множестве областей – военное дело, медицина, системы безопасности, оцифровка аналоговых сигналов. Одним из вариантов распознавания образов является детектирование объектов на изображениях, то есть определение наличия объекта на изображении и нахождение его положения в системе координат пикселей исходного изображения. Для того, чтобы корректно

определить наличие объекта на изображении и найти его положение, необходимо составить множество критериев, на основании которых будет производиться поиск объекта. Однако характеристики критериев имеют сильную зависимость от выбора алгоритма детектирования, поскольку положение объекта может определяться координатами прямоугольника, окаймляющего объект, либо контуром этого объекта, либо координатами точек, наиболее характерных для объекта.

Подобного вида задачи чаще всего решаются с помощью сверточных нейронных сетей – YOLO, Fast R-CNN, MobileNet-SSD [1–5]. К сожалению, обучение сверточных нейронных сетей занимает большое количество времени и является ресурсозатратным.

Одним из возможных методов решения задачи детектирования является использование итеративных адаптационных алгоритмов машинного обучения, которые позволяют строить модели классов объектов и на основе которых базируются алгоритмы вывода для поиска объектов на изображении. Использование алгоритмов машинного обучения позволяет минимизировать погрешности детектирования, исключить человеческий фактор и реализовать детектирование объекта в режиме реального времени.

В данной работе рассматривается применение каскадного классификатора Хаара и каскадного классификатора LBP (Local Binary Patterns), основанного на применении локальных бинарных шаблонов, для решения задачи определения допустимого места измерения толщины комплекса интима-медиа артериальной стенки сонной артерии.

Постановка задачи

Задача распознавания изображений базируется на задаче идентификации объекта или определения его свойств по его изображению.

Однако для решения задачи определения допустимого места измерения толщины комплекса интима-медиа артериальной стенки сонной артерии, необходимо не только корректно распознать наличие артериальной стенки, но и принять решение о возможности и успешности измерения комплекса интима-медиа.

Рассмотрим постановку многокритериальной задачи принятия решения.

Определение корректного критерия для задачи принятия решения является главным фактором выбора альтернативы из множества возможных альтернатив.

Предположим, что мы имеем некоторое множество оценок O . В то же время мы имеем некоторую оценку C , принимающую значение на этом множестве и являющуюся оценочной функцией. Значение оценочной функции будет приниматься как «наилучшее решение» в зависимости от смысла выбранного критерия. В этом случае, если $A = \{a_1, \dots, a_n\}$ представляет собой множество решений, тогда $C: A \rightarrow O$.

В случае, когда необходимо принять решение на основе двух альтернатив a_i и a_k необходимо выразить отношение предпочтения, при кото-

ром одна альтернатива будет предпочтительнее. Подобное предпочтение так же можно выразить через значение оценочной функции $C(a_j)$, где a_j является предпочтительной альтернативой.

Приведенная выше постановка отражает принятие решения на основе одного критерия. Однако достаточно сложно найти задачу, при рассмотрении которой принятие решения базируется на одном критерии. Адаптируем постановку задачи для многокритериального случая.

Допустим, существует множество критериев C_1, \dots, C_m , где $m > 1$. Тогда $C_i: A \rightarrow O_i$, где O_i множество значений функции C_i .

На основании представленной постановки задачи многокритериального принятия решения можно сделать вывод, что задачи подобного вида определяются множеством возможных решений A , множеством критериев C и отношениями предпочтения на множестве A [6].

Итеративные адаптационные алгоритмы

Особенностью определения места для измерения на ультразвуковом снимке является относительно небольшие размеры поисковой области – порядка нескольких пикселей. Данный момент значительно усложняет поставленную задачу детектирования, ведь помимо небольшого размера искомой области, ультразвуковое исследование (УЗ) снимка представляет собой набор повторяющихся признаков, которые комбинируются в различных положениях. Таким образом, необходимо учитывать динамическую составляющую для решения задачи и подбирать алгоритм, который может адаптироваться в процессе распознавания, для достижения наилучших результатов детектирования и уменьшения процента ошибочных распознаваний.

Процесс изменения параметров алгоритма и структуры системы на основе быстроизменяющихся параметров называется адаптацией. Данный процесс позволяет системе достичь необходимого состояния, несмотря на начальную неопределенность и изменяющиеся условия работы.

Бустинг (англ. boosting – улучшение) – это мета-алгоритм машинного обучения. Основная идея бустинга заключается в комбинировании слабых функций, которые получаются в результате итеративного процесса, на каждом шаге которого модель обучается с использованием данных об ошибках предыдущих шагов. Классификатором является сильный обучающий алгоритм, который хорошо коррелирует с правильной классификацией [7].

Одним из примеров использования бустинга является метод Виолы-Джонса, который строит сильный обучающий алгоритм на основе признаков Хаара. Признаки Хаара – это прямоугольные особенности, подобные вейвлетам Хаара, каждый из которых является двоичной маской, т.е. черно-белым изображением [8; 9].

Метод Виолы-Джонса заключается в следующем: окно установленного размера движется по изображению, и рассчитывается признак Хаара для каждой области, над которым проходит окно. Для того, чтобы определить наличие или отсутствие предмета, рассчитывается разность между значением признака и обучаемым порогом. Однако из-за того, что признаки Хаара мало подходят для классификации или обучения, необходимо использовать большое число признаков, чтобы описать объект с достаточной точностью. Именно поэтому в методе Виолы-Джонса признаки Хаара организованы в каскадный классификатор [10].

Классификатор, построенный на признаках Хаара, может использоваться в режиме реального времени, т.к. признаки Хаара могут вычисляться за постоянное время при использовании интегрального представления изображения. Высокая скорость является доминирующим преимуществом использования данного подхода в сравнении с аналогичными алгоритмами.

LBP представляет собой определенный вид признака, который может быть использован для классификации в компьютерном зрении. Это эффективный оператор, преобразующий каждый пиксель изображения в двоичное число, которое зависит от интенсивности соседних пикселей изображения [9].

Алгоритм adaptive boosting (адаптивного усиления) лежит в основе формирования каскада классификаторов, или сокращенно AdaBoost (мета-алгоритм, предложенный Йоавом Фройндом и Робертом Шапиро) [9]. Этот алгоритм менее подвержен переобучению по сравнению с другими алгоритмами машинного обучения и может использоваться в сочетании с несколькими алгоритмами классификации для повышения их эффективности. Однако AdaBoost чувствителен к шуму в данных и случайным выбросам.

Построение линейной комбинации классификаторов

Слабым классификатором является функция, которая принимает на вход изображение и вычисляет значение соответствующего ей признака Хаара для этого изображения, после чего сравнивает это значение с порогом, возвращая 0 или 1.

Рассмотрим алгоритм построения каскадного классификатора:

1. Определяем количество этапов обучения, количество отрицательных примеров и количество положительных примеров. Производим инициализацию весов.
2. Производим нормализацию весов обучающих примеров.
3. Минимизируем ошибку для каждого слабого классификатора путем поиска параметров для признаков Хаара.
4. Производим поиск классификатора с наименьшей ошибкой.
5. Для каждого обучающего примера корректируем веса на основе проведенных расчетов. Возвращаемся к пункту 2.

После того, как приведенный выше алгоритм выполнит заданное количество этапов обучения, будет сформирован итоговый классификатор.

В данной работе исследуются следующие алгоритмы бустинга:

- Discrete AdaBoost – ранняя версия AdaBoost рассматривала композицию из алгоритмов $h \in H$, которые возвращают лишь значения из $Y = \{-1, +1\}$;
- Real AdaBoost – обобщен на случай, когда $h \in H$ возвращают вероятность принадлежности классу $\{+1\}$;
- LogitBoost – композиция бинарных классификаторов строится с использованием идеи логистической регрессии;
- Gentle AdaBoost – отличается от Real AdaBoost вычислением отклика слабого классификатора [11].

Обработка результатов экспериментальных исследований

Обучающая выборка для каскадных классификаторов состоит из набора положительных и отрицательных примеров изображений объектов, которые необходимо детектировать. Выборка должна содержать максимально возможное количество изображений, на которых присутствует детектируемый объект в требуемых ракурсах разной световой композиции. К примеру, для стабильного детектора лиц требуется 3000–4000 положительных и столько же отрицательных примеров. Отрицательные примеры изображения не должны содержать детектируемый объект. Особое внимание стоит уделить фону изображения – он должен совпадать с тем, в какой среде будет необходимо детектировать объект.

В качестве предметной области были выбраны изображения по ультразвуковому исследованию

толщины комплекса интима-медиа артериальной стенки сонной артерии. Автоматический выбор места для измерения толщины является актуальной задачей, поскольку подобная реализация ускоряет процесс обработки результатов ультразвукового исследования специалистом. Обучающая выборка содержит 129 положительных изображений, содержащих оптимальное место для измерения, и 466 отрицательных примеров.

Сложность оценки качества обучения каскадов и детектирования заключается в том, что выбор зоны для оптимального определения интима-медиа артериальной стенки сонной артерии является относительно субъективным мнением специалиста, который обрабатывает результаты УЗИ. Существует ряд особенностей для выбора оптимальной зоны: четкий кадр, участок артерии должен быть прямой, без разрывов.

Коэффициент качества детектирования – это отношение количества неверных классификаций к общему количеству изображений.

$$C = \frac{P_{\text{пром}}}{P_{\text{общ}}}, \quad (5)$$

где $P_{\text{пром}}$ – количество неверных классификаций, $P_{\text{общ}}$ – общее количество изображений.

Для того, чтобы определить достоверность детектирования, на эталонных и итоговых изображениях находятся координаты выделенных областей. Координаты областей итогового изображения поочередно сравниваются с координатами области эталонного изображения. В случае, если области накладываются друг на друга – детектирование считается успешным.

Рассмотрим параметры обучения каскадных классификаторов:

- тип бустинга;
- коэффициент, определяющий качество обучения;
- уровень ложной тревоги;
- количество этапов обучения.

Настраиваемыми параметрами являются количество соседей, минимальный размер.

Количество соседей – параметр, указывающий, сколько соседей должен иметь каждый прямоугольник кандидата, чтобы сохранить его. Более высокое число дает более низкие ложные срабатывания.

Минимальный размер – размер прямоугольника, являющийся допустимым местом для измерения комплекса интима-медиа.

Таким образом, выведена стратегия исследования качества детектирования для каждого каскадного классификатора:

– исследование качества детектирования в зависимости от количества этапов обучения при количестве соседей от 1 до 4, для определения оптимального числа этапов обучения на основании минимальной частоты ошибок;

– исследование качества детектирования в зависимости от типа бустинга при оптимальном числе этапов обучения;

– исследование качества детектирования в зависимости от коэффициента, определяющего качество обучения при оптимальном числе этапов обучения;

– исследование качества детектирования в зависимости от уровня ложной тревоги при оптимальном числе этапов обучения;

На рисунке 1 представлена диаграмма сравнения эффективности использования типов бустинга применительно к каскадным классификаторам Хаара и LBP. Как видно из диаграммы, доля неправильно распознанных объектов при использовании каскадного классификатора Хаара значительно ниже с типом бустинга Gentle. Однако, аналогичное значение доли неправильно распознанных объектов показал и каскадный классификатор LBP с типом бустинга LogitBoost.

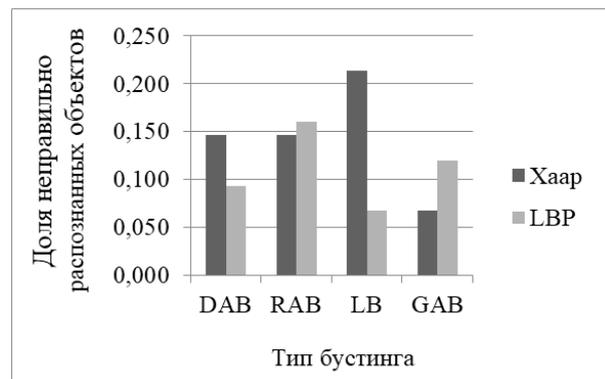


Рисунок 1 Сравнительная диаграмма эффективности использования типов бустинга

На рисунке 2 представлена диаграмма сравнения результатов тестирования каскадных классификаторов Хаара и LBP при разных значениях коэффициентов, определяющих качество обучения. Согласно диаграмме, значение доли неправильно распознанных объектов при использовании каскадного классификатора Хаара меньше, чем при использовании каскадного классификатора LBP. На данной обучающей выборке значения коэффициентов обучения не влияют на долю неправильно распознанных объектов при решении задачи детектирования допустимых участков измерения толщины комплекса интима-медиа артериальной стенки сонной артерии.

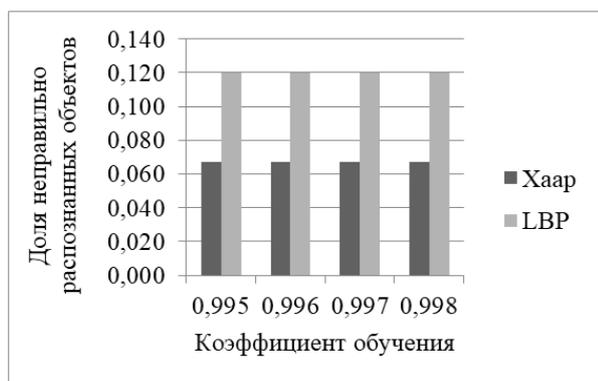


Рисунок 2 Сравнительная диаграмма эффективности использования разных значений коэффициентов обучения

На рисунке 3 представлена диаграмма сравнения результатов тестирования каскадных классификаторов Хаара и LBP при разных уровнях ложной тревоги. Как видно из диаграммы, доля неправильно распознанных объектов при использовании каскадного классификатора Хаара, в среднем, ниже, чем при использовании каскадного классификатора LBP.

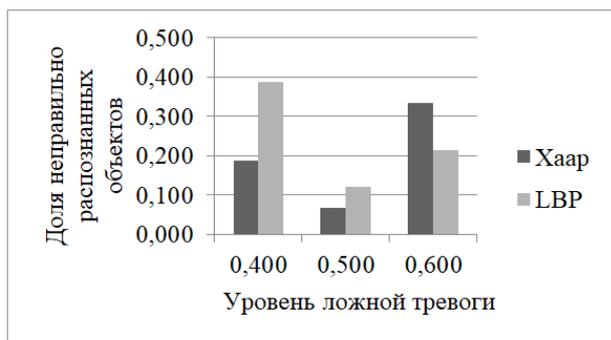


Рисунок 3 Сравнительная диаграмма использования разных уровней ложной тревоги

На рисунке 4 представлены зависимости доли неправильно распознанных объектов каскадного классификатора LBP и Хаара от числа этапов обучения. Для каскадного классификатора LBP 13 является оптимальным значением числа этапов обучения, поскольку при числе этапов более 14 классификатор начинает переучиваться. Так же рисунок 4 показывает, что для каскадного классификатора Хаара минимальная доля неправильно распознанных объектов достигается при использовании 18 этапов обучения.

Приведенные диаграммы показывают, что каскадный классификатор Хаара имеет меньшее среднее значение доли неправильно распознанных объектов. Однако каскадный классификатор LBP может достичь заданного значения доли неправильно распознанных объектов детектирования, если обучающая выборка будет увеличена и будут подобраны более оптимальные параметры классификатора.

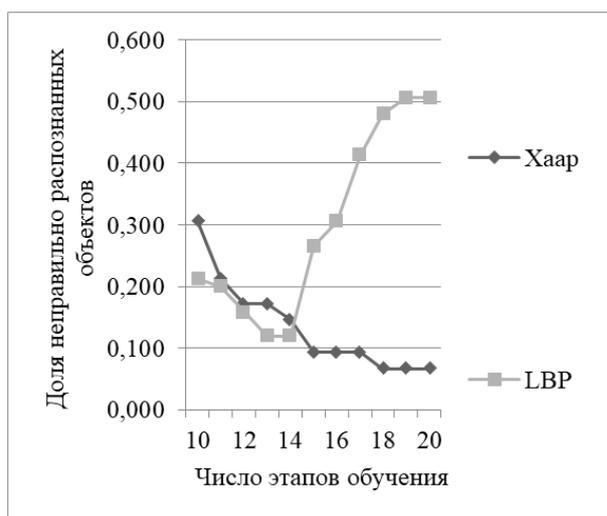


Рисунок 4 График зависимости доли неправильно распознанных объектов от количества этапов обучения

Заключение

Произведен сравнительный анализ значений доли неправильно распознанных объектов при помощи каскадного классификатора Хаара и каскадного классификатора LBP.

По результатам проведенного исследования для получения наилучших результатов детектирования описанной предметной области при помощи каскадного классификатора Хаара и каскадного классификатора LBP необходимо проводить обучение, используя следующие значения параметров:

- при использовании каскадного классификатора Хаара – уровень ложной тревоги 0,5, тип бустинга GAB (Gentle AdaBoost), коэффициент, отвечающий за качество обучения, 0,999;
- при использовании каскадного классификатора LBP – уровень ложной тревоги 0,5, тип бустинга LB (LogitBoost), коэффициент, отвечающий за качество обучения, 0,999.

Литература

1. Wang K., Liu M. YOLO-Anti: YOLO-Based counterattack model for unseen congested object detection // Pattern recognition. 2022. Vol. 131. P. 108814.
2. Жомарткызы Г., Тлеудин Е.А. Fast R-CNN алгоритм распознавания объектов // Интернаука. 2022. №18-1(241). С. 56–58.
3. Abdulghafoor N.H., Abdullah H.N. Real-time moving objects detection and tracking using deep-stream technology // Journal of Engineering Science and Technology. 2021. Vol. 16, no. 1. P. 194–208.
4. Murthy Ch.B., Hashmi M.F., Keskar A.G. Optimized MobileNET + SSD: a real-time pedestrian detection on a low-end edge device //

- International Journal of Multimedia Information Retrieval. 2021. Vol. 10, no. 3. P. 171–184.
5. Deng P., Wang K., Han X. Real-time object detection based on YOLO-V2 for tiny vehicle object // SN Computer Science. 2022. Vol. 3, no. 4. P. 1–10.
 6. Уткин Л.В. Принятие решений в условиях неопределенности. СПб: СПбПУ, 2014. 199 с.
 7. Бустинг, AdaBoost. URL: <https://neerc.ifmo.ru/wiki/index.php?title=%D0%91%D1%83%D1%81%D1%82%D0%B8%D0%BD%D0%B3,AdaBoost> (дата обращения: 01.11.2023).
 8. Белых Е.А. Обучение каскадов Хаара // Вестник Сыктывкарского университета. Серия: Математика. Механика. Информатика. URL: <https://cyberleninka.ru/article/v/obuchenie-kaskadov-haara> (дата обращения: 01.11.2023).
 9. AdaBoost – Wikipedia. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/AdaBoost> (дата обращения: 01.11.2023).
 10. Казанцева И.С., Солдатова О.П. Решение задачи детектирования изображений при помощи каскадных классификаторов // Перспективные информационные технологии (ПИТ–2019): материалы Международной научно-технической конференции. Самара: СНЦ РАН, 2019. С. 256–260.
 11. Болотова Ю.А., Федотова Л.С., Спицын В.Г. Алгоритм детектирования областей лиц и рук на изображении на основе метода Виолы-Джонса и алгоритма цветовой сегментации // Фундаментальные исследования. 2014. № 11-10. С. 2130–2134. URL: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=35905> (дата обращения: 02.11.2023).

Получено 08.11.2023

Бельгер Ирина Сергеевна, аспирант кафедры информационных систем и технологий (ИСТ) Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева (Самарский университет). 443086, Российская Федерация, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34. Тел. +7 927 722-48-73. Тел. +7 927 650-27-46. E-mail: irina.belger@mail.ru

Солдатова Ольга Петровна, к.т.н., доцент кафедры ИСТ Самарского университета. 443086, Российская Федерация, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34. Тел. +7 927 654-29-33. E-mail: op-soldatova@yandex.ru

ITERATIVE ADAPTATION ALGORITHMS IN MULTICRITERIA TASKS

Belger I.S., Soldatova O.P.

Samara National Research University, Samara, Russian Federation

E-mail: irina.belger@mail.ru, op-soldatova@yandex.ru

This article examines using of iterative adaptation algorithms to solve the problem of determining measurement location of the carotid artery intima-media complex. The formulation of a multi-criteria decision-making problem, as the basis for determining correct criterion for proper selection and successful recognizing of the required object in an ultrasound image. The work discusses principles of constructing cascade classifiers as well as, the use of the cascade Haar classifier and the cascade LBP classifier, for which Haar primitives and local binary templates are used as a basis. The results of experimental studies in order to determine effectivity of different boosting algorithms to solve this problem are presented. The best results were shown by the Haar cascade classifier, developed using an iterative adaptation algorithm, which manages solving a multicriteria problem on a given training set more successfully and determines the most suitable areas for measuring the thickness of the common carotid artery intimate media complex.

Keywords: *adaptation algorithms, boosting, multicriteria task, cascade classifier, Haar cascade, LBP cascade, Haar features, Adaboost, local binary patterns*

DOI: 10.18469/ikt.2023.21.2.08

Belger Irina Sergeevna, Samara National Research University, 34, Moskovskoe shosse, Samara, 443086, Russian Federation; PhD Student of Information Systems and Technologies Department. Tel. +7 927 650-27-46. E-mail: irina.belger@mail.ru

Soldatova Olga Petrovna, Samara National Research University, 34, Moskovskoe shosse, Samara,

443086, Russian Federation; Associated Professor of Information Systems and Technologies Department. Tel. +7 927 654-29-33. E-mail: op-soldatova@yandex.ru

References

1. Wang K., Liu M. YOLO-Anti: YOLO-Based counterattack model for unseen congested object detection. *Pattern recognition*, 2022, vol. 131, pp. 108814.
2. ZHornartkyzy G., Tleudin E.A. Fast R-CNN object recognition algorithm. *Internauka*, 2022, no.18-1(241), pp. 56–58. (In Russ.)
3. Abdulghafoor N.H., Abdullah H.N. Real-time moving objects detection and tracking using deep-stream technology. *Journal of Engineering Science and Technology*, 2021, vol. 16, no. 1, pp. 194–208.
4. Murthy Ch.B., Hashmi M.F., Keskar A.G. Optimized MobileNET + SSD: a real-time pedestrian detection on a low-end edge device. *International Journal of Multimedia Information Retrieval*, 2021, vol. 10, no. 3, pp. 171–184.
5. Deng P., Wang K., Han X. Real-time object detection based on YOLO-V2 for tiny vehicle object. *SN Computer Science*, 2022, vol. 3, no. 4, pp. 1–10.
6. Utkin L.V. *Decision Making under Uncertainty*. Saint Petersburg: SPbPU, 2014, 199 p. (In Russ.)
7. Boosting, AdaBoost. URL: https://neerc.ifmo.ru/wiki/index.php?title=%D0%91%D1%83%D1%81%D1%82%D0%B8%D0%BD%D0%B3,_AdaBoost (accessed: 01.11.2023). (In Russ.)
8. Belyh E.A. Training Haar cascades. *Vestnik Syktyvkarского университета. Seriya: Matematika. Mekhanika. Informatika*. URL: <https://cyberleninka.ru/article/v/obuchenie-kaskadov-haara> (accessed: 01.11.2023). (In Russ.)
9. AdaBoost – Wikipedia. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/AdaBoost> (accessed: 01.11.2023) (In Russ.)
10. Kazantseva I.S., Soldatova O.P. Solving the problem of image detection using cascade classifiers. *Perspektivnye informacionnye tekhnologii (PIT-2019): materialy Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii*. Samara: Izd-vo SNTs RAN, 2019, pp.256–260. (In Russ.)
11. Bolotova U.A., Fedotova L.S., Spicyn V.G. Algorithm for detecting areas of faces and hands in an image based on the Viola-Jones method and color segmentation algorithm. *Fundamental'nye issledovaniya*, 2014, no. 11-10, pp. 2130–2134. URL: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=35905> (accessed: 01.11.2023) (In Russ.)

Received 08.11.2023

УДК 004.89

ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ПРИЕМО-СДАТОЧНЫХ ИСПЫТАНИЯХ

Тарасов А.А., Лезина И.В.

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, РФ
E-mail: tarasov.aa.1@ssau.ru, lezina.iv@ssau.ru

Данная статья рассматривает применение нейросетевых методов, а именно нечеткого перцептрона, в задачах, требующих проведение приемо-сдаточных испытаний. Было проведено исследование по использованию различных нечетких функций при решении задачи аппроксимации плотностей вероятностей. Эксперименты проведены на временных рядах с известными законами распределения, с оценкой качества аппроксимации через среднеквадратичное отклонение в серии из 29 испытаний. В результате исследований при использовании Гауссовой функции принадлежности было получено среднее значение среднеквадратического отклонения равное 00145, что подтверждает хорошие аппроксимативные способности нечеткого перцептрона. Система была протестирована на данных приемо-сдаточных испытаний двигателя газоперекачивающих агрегатов. В этом случае оценка качества аппроксимации проводилась с использованием критерия согласия Колмогорова-Смирнова. Результаты анализа подтверждают высокую аппроксимативную способность нечеткого перцептрона, подчеркивая его применимость в реальных приемо-сдаточных испытаниях.

Ключевые слова: нейронные сети, нечеткие функции, аппроксимация, приемо-сдаточные испытания, C-Means, нечеткий перцептрон, плотность распределения вероятности

Введение

В современном мире статистические методы анализа данных являются важным шагом в научных исследованиях. Не умаляя достоинств теоретических методов исследования, значение экспериментальных методов трудно переоценить. Только с помощью эксперимента возможно получение достоверной информации об исследуемом объекте в реальном масштабе времени, после обработки которой возможно построение ее модели [1].

В различных научных исследованиях возникает необходимость определения параметров случайного процесса, дающих его исчерпывающее описание. На практике для их получения требуется решить задачу аппроксимации, позволяющую на основе имеющихся данных получить функцию, описывающую случайный процесс [2]. Задача аппроксимации плотности распределения вероятностей является важной, так как во многих прикладных задачах выдвигается гипотеза о распределении статистического ряда, которую необходимо проверить.

В данной работе рассматривается применение методов аппроксимации в задачах приемо-сдаточных испытаний.

Использование аппроксимации в данных задачах позволяет:

- анализировать данные для более точных оценок измерений, особенно в случае ограниченного набора данных или наличия шума;
- производить моделирование данных с целью прогнозирования поведения системы;
- уменьшить количество необходимых испытаний и измерений, что позволит сократить время и затраты на проведение приемо-сдаточных испытаний.

Обзор методов аппроксимации

Как показано в [3], методы аппроксимации можно разделить на два класса:

1. Параметрические методы аппроксимации.
2. Методы непараметрической статистики.

Применение методов из первой группы основано на гипотезе о конкретном виде функции плотности распределения. Для оценки параметров функции применяется, например, метод максимального правдоподобия [2]. Стоит отметить, что на практике бывает затруднительно проверить гипотезу о принадлежности выборки конкретному распределению, что делает невоз-

можным применение методов параметрической аппроксимации.

Этого недостатка лишены методы второй группы. К ним можно отнести следующие алгоритмы [2]:

- аппроксимация сплайнами;
- аппроксимация ортогональными полиномами;
- ядерная оценка.

Общим недостатком этих оценок является то, что при построении модели не учитываются условия нормировки и неотрицательности полученной оценки. Это приводит к тому, что аппроксимирующее выражение может не являться плотностью распределения [4]. Также к недостаткам стоит отнести невозможность оценить параметры аппроксимируемой плотности.

Нейросетевая аппроксимация

Еще одним методом непараметрической статистики является использование нейронной сети в качестве универсального аппроксиматора. Корректность данной оценки следует из теоремы Хета-Нильсена о представимости любой многомерной функции нескольких переменных с помощью нейронной сети фиксированной размерности [5]. Таким образом, любую сложную функцию можно заменить более простой нейросетевой аппроксимацией, причем требуется только нелинейность функции активации нейрона.

Аппроксимирующие нейронные сети обладают целым рядом преимуществ по сравнению с другими способами аппроксимации:

- нейронные алгоритмы имеют потенциал для распараллеливания процесса обработки информации одновременно между всеми нейронами, что приводит к многократному ускорению работы нейронной сети;
- благодаря большому количеству нейросетевых соединений, сеть становится нечувствительной к ошибкам, возникающим в отдельных нейронах в процессе аппроксимации;
- нейросетевые модели позволяют добиться меньшей ошибки аппроксимации по сравнению с другими методами непараметрической статистики [4];
- оценка плотности вероятности является более гладкой, чем при использовании сплайнов и ортогональных полиномов.

Однако нейронные сети также не лишены ряда недостатков. Во-первых, для них также не выполняются условия нормировки и неотрица-

тельности. Во-вторых, аппроксимирующее выражение является в разы более сложным, чем при использовании полиномов.

Также для получения качественной модели необходимо подобрать параметры нейронной сети, что является сугубо эвристическим действием, не зависящим от определенной математической формулы.

Подготовка данных

Для построения оценки плотности распределения вероятности необходимо произвести первичное оценивание, построив гистограмму наблюдаемого статистического ряда, и выделить на ней точки $\{x_i, y_i\}, i = \overline{1, M}$, где M – число дифференциальных коридоров гистограммы, которые и будут входить в выборку данных. Для построения гистограммы в данной работе используется алгоритм, предложенный в [2].

В процессе обучения и работы на вход нейронной сети подается значение, равное координате середины интервала гистограммы плотности вероятности, а на выходе сети должно получиться значение, соответствующее ординате гистограммы в данной точке.

Нечеткий персептрон

В данной работе для решения задачи аппроксимации предлагается использовать модель нечеткого персептрона. Для данного типа сети сформулирована теорема об универсальной аппроксимации, которая утверждает, что любая непрерывная функция на замкнутом интервале может быть представлена сходящимся рядом полиномов [5].

В случае нечеткого персептрона достаточно одного скрытого слоя для построения равномерной аппроксимации с заданной точностью для любого обучающего множества, представленного набором обучающих пар. Однако теорема не утверждает, что использование одного скрытого слоя дает оптимальные результаты в плане сходимости и скорости работы алгоритма.

Структура нечеткого персептрона, представленная на рисунке 1, является гибридной и объединяет в себе сеть с нечеткой организацией и многослойный персептрон.

Использование гибридной архитектуры оправдано тем фактом, что при использовании гибридной сети задача разделяется на два независимых этапа, реализуемых отдельно друг от друга: этап фуззификации и этап работы многослойного персептрона (постпроцессора), приписывающего

каждой группе кластеров соответствующий ей результат.

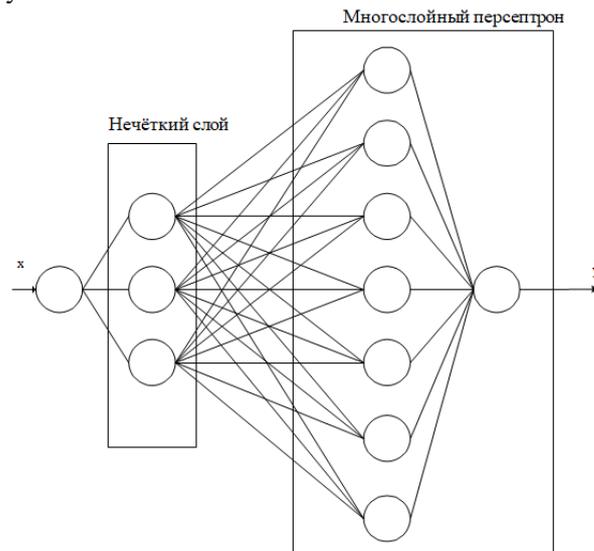


Рисунок 1. Структура нечеткого персептрона

Использование препроцессора, размерность которого больше размерности входного вектора, обосновывается теоремой Ковера о разделимости образов. В ней утверждается, что преобразование задачи классификации в пространство более высокой размерности повышает вероятность линейной разделимости образов. Это позволяет подавать на вход многослойного персептрона уже откластеризованные данные [6].

Постпроцессор в виде многослойного персептрона осуществляет перевод коэффициентов принадлежности точки множествам кластеризации в оценку плотности вероятности в данной точке.

Аппроксимирующее выражение для нечеткого персептрона можно представить в виде:

$$y(x) = f \left(\sum_{i=1}^K w_{iout} f \left(\sum_{j=1}^n w_{ji} \varphi(x, c_j, \sigma_j) \right) \right), \quad (1)$$

где K – количество нейронов в персептронном слое;

x – координата середины интервала гистограммы;

w_{iout}, w_{ji} – значения весов;

n – количество нечетких нейронов;

φ – нечеткая функция;

f – функция активации персептронного слоя;

c_j, σ_j – значения параметров нечеткой функции.

Нечеткие функции

Ниже представлены нечеткие функции, используемые в данной работе.

Гауссова функция:

$$\varphi(x, c, \sigma) = \exp\left(-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}\right). \quad (2)$$

Функция Епанечникова [9]:

$$\varphi(x, c, \sigma) = \frac{3}{4}\left(1 - \frac{(x-c)^2}{\sigma^2}\right). \quad (3)$$

Сигмоидальная функция:

$$\varphi(x, c, \sigma) = \frac{2}{\pi} \frac{1}{\exp\left(\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}\right) + \exp\left(-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}\right)}. \quad (4)$$

Алгоритмы обучения нечеткого персептрона

Алгоритм обучения нечеткого персептрона носит двухэтапный характер. Первым этапом является определение параметров нечетких нейронов. После выполнения данного шага значения параметров замораживаются и начинается обучение многослойного персептрона.

Обучение нечеткого персептрона требует определения центров нечеткой функции. В данной работе используется алгоритм С-Means [7]. Для некоторых функций также требуется параметр ширины. В разработанной системе для этого используется метод Р-ближайших соседей [8].

Для обучения многослойного персептрона применялся алгоритм обратного распространения ошибки. Минимизировалась метрика MSE.

Исследование по аппроксимации плотностей распределения вероятностей

После обучения нейронной сети необходимо оценить качество полученного нейросетевого решения задачи аппроксимации.

С этой целью были сгенерированы временные ряды, подчиняющиеся заранее известным законам распределения вероятностей. Было проведено исследование по аппроксимации плотностей веро-

ятностей при помощи различных нечетких функций [10]. Качество аппроксимации оценивалось при помощи среднеквадратичного отклонения (СКО). Проводилась серия из 29 испытаний. В таблице 1 представлены максимальные значения СКО.

Тестирование проводилось на следующих параметрах нейронной сети:

- обучающие выборки построены по 10000 отсчетам;
- тестовая выборка с аналогичными характеристиками;
- коэффициент обучения – 0.03;
- функция активации многослойного персептрона – логистическая с параметром 5;
- число дифференциальных коридоров гистограммы – 15;
- число нейронов в нечетком слое – 12;
- число нейронов в многослойном персептроне – 15.

На основании данных из таблицы 1 мы можем сделать вывод, что нечеткий персептрон обладает хорошими аппроксимативными способностями. В среднем наилучшие результаты были получены при помощи нечеткой Гауссовой функции.

Исследование по аппроксимации плотностей распределения вероятностей данных прямо-сдаточных испытаний

Система была апробирована на данных прямо-сдаточных испытаний двигателя газоперекачивающих агрегатов. Так как распределение вероятности данных в данном случае нам неизвестно, для оценки качества аппроксимации использовался критерий согласия Колмогорова-Смирнова. Данный критерий используется для проверки гипотезы об однородности двух рассматриваемых выборок. В нашем случае сравниваются распределение вероятности реальных данных и выхода нейронной сети [11].

Для данной задачи использовалась конфигурация нейронной сети аналогичная той, что была

Таблица 1. Зависимость СКО аппроксимации нечетким персептроном от вида нечеткой функции

Закон распределения вероятностей	Нечеткая функция		
	Гауссова функция	Функция Епанечникова	Сигмоидальная функция
Нормальный	0,0005	0,0268	0,0016
Экспоненциальный	0,0026	0,0098	0,0045
Лапласа	0,003	0,0163	0,0014
Вейбулла	0,0009	0,0082	0,0025
Релэя	0,0012	0,0084	0,0016
Арсинусоидальный	0,0005	0,0011	0,0055

в прошлом эксперименте с нечеткой Гауссовой функцией.

Результаты анализа представлены на рисунках 2–4 и в таблице 2.

На основании полученных данных мы можем сделать вывод, что нечеткий перцептрон обладает хорошими аппроксимативными способностями.

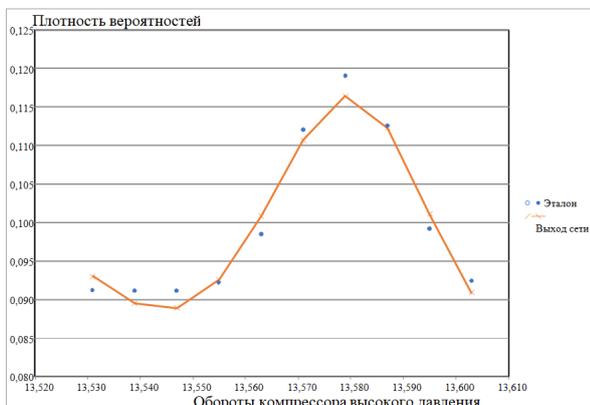


Рисунок 2. Сравнение эталона и выхода сети. Данные «Обороты компрессора высокого давления»

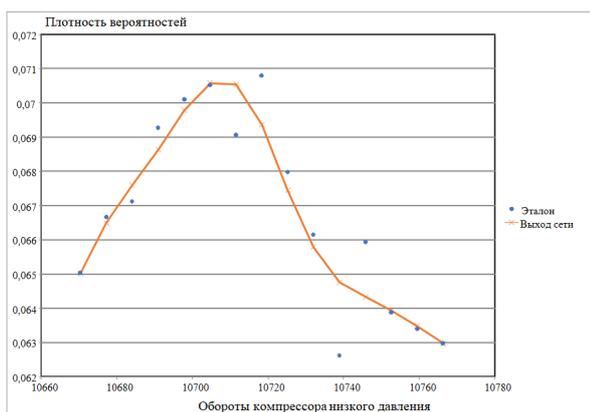


Рисунок 3. Сравнение эталона и выхода сети. Данные «Обороты компрессора низкого давления»

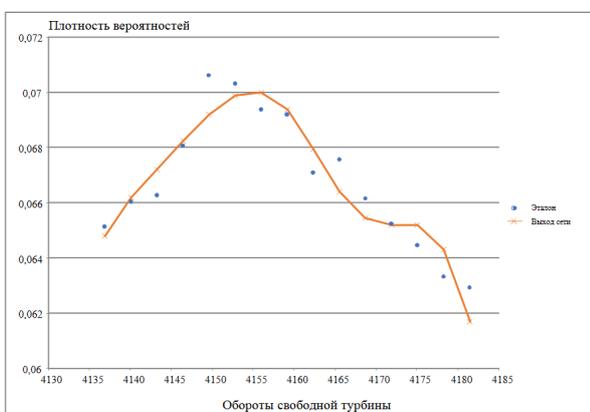


Рисунок 4. Сравнение эталона и выхода сети. Данные «Обороты свободной турбины»

Таблица 2. Критерий Колмогорова-Смирнова для данных приемо-сдаточных испытаний

Данные	Критерий Колмогорова-Смирнова
Обороты компрессора высокого давления	0.0003
Обороты компрессора низкого давления	0.0007
Обороты свободной турбины	0.0005

Заключение

В данной работе было описано использование нейросетевых методов в задачах аппроксимации плотностей распределения вероятностей. Были проведены эксперименты по подтверждению корректности результатов, а также исследование по выбору оптимальной нечеткой функции. Проведенные исследования показали корректность применения нечеткого перцептрона в задачах аппроксимации.

Литература

1. Прохоров С.А., Куликовских И.М. Численные методы, алгоритмы и комплексы программ для проведения вычислительного и натурного экспериментов. Самара: Инсома-пресс, 2019. 208 с.
2. Прохоров С.А. Аппроксимативный анализ случайных процессов. Самара: СНЦ РАН, 2001. 380 с.
3. Терехов С.А. Нейросетевые аппроксимации плотности распределения вероятности в задачах информационного моделирования // Нейроинформатика–2002: материалы Всероссийской научно-технической конференции. М.: МИФИ, 2002. С. 94–120.
4. Лезина И.В. Аппроксимативный анализ законов распределения ортогональными полиномами и нейросетевыми моделями: дис. ... канд. техн. наук. Самара, 2012. 108 с.
5. Хайкин С. Нейронные сети: 2-е изд., исправленное; пер. с англ. М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2006. 1104 с.
6. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации / пер. с польск. И.Д. Рудинского. М.: Финансы и статистика, 2002. 344 с.
7. Bezdek J.C., Ehrlich R., Full W. FCM: The fuzzy c-means clustering algorithm // Computers and geosciences. 1984. Vol.10, no. 2–3. P. 191–203.
8. Tarasenko L. Supervised and unsupervised learning in radial basis function classifiers // IEEE Proceedings – Vision, Image and Signal Processing. 1994. no. 4. P. 210–216.

9. Дьерфи Л., Деврой Л. Непараметрическое оценивание плотности. L1-Подход / пер с англ. А.Б. Цыбакова. М.: Мир, 1988, 408 с. материалы международной научно-технической конференции. Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2020. С. 61–63.
10. Тарасов А.А., Лезина И.В. Исследование аппроксимативных возможностей нечеткого перцептрона при использовании различных ядерных функций // Перспективные информационные технологии (ПИТ–2020): материалы международной научно-технической конференции. Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2020. С. 61–63.
11. Колмогоров А.Н. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Наука, 1986. 535 с.

Получено 07.11.2023

Тарасов Артем Алексеевич, аспирант кафедры информационных систем и технологий (ИСТ) Самарского национального исследовательского университета имени С.П. Королева (Самарский университет). 443086, Российская Федерация, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34. Тел. +7 927 745-18-36. E-mail: tarasov.aa.1@ssau.ru

Лезина Ирина Викторовна, доцент кафедры ИСТ Самарского университета. 443086, Российская Федерация, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34. Тел. +7 927 209-96-02. E-mail: lezina.iv@ssau.ru

USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE MODELS IN ACCEPTANCE TESTS

Tarasov A.A., Lyozina I.V.

Samara National Research University, Samara, Russian Federation

E-mail: tarasov.aa.1@ssau.ru, lezina.iv@ssau.ru

This paper describes the application of fuzzy perceptron in acceptance testing problems. A study on the use of various fuzzy functions in solving the problem of approximation of probability densities was carried out. Experiments were conducted on time series with preset distribution laws, evaluating approximation quality using standard deviation in the series of 29 tests. As a result of the research, using Gaussian fuzzy function, the mean value of standard deviation equal to 0.00145 determined which confirms good approximative ability of the fuzzy perceptron. The system was tested on the acceptance test data of the gas compressor engine. In this case, approximation quality was assessed using the Kolmogorov-Smirnov agreement criterion. Analysis results confirm the high approximative ability of the fuzzy perceptron, emphasizing its applicability in real acceptance tests.

Keywords: *neural networks, fuzzy function, approximation, acceptance tests, C-Means, fuzzy perceptron, probability density*

DOI: 10.18469/ikt.2023.21.2.09

Tarasov Artyom Alekseevich, Samara National Research University, 34, Moskovskoe shosse, Samara, 443086, Russian Federation; PhD Student of Information Systems and Technologies Department. Tel. +7 927 745-18-36. E-mail: tarasov.aa.1@ssau.ru

Lyozina Irina Viktorovna, Samara National Research University, 34, Moskovskoe shosse, Samara, 443086, Russian Federation; Associate Professor of Information Systems and Technologies Department. Tel. +7 927 209-96-02. E-mail: lezina.iv@ssau.ru

References

1. Prokhorov S.A., Kulikovskih I.M. *Numerical Methods, Algorithms, and Software Complexes for Conducting Computational and Experimental Studies*. Samara: Insoma-press, 2019, 208 p. (In Russ.)
2. Prokhorov S.A. *Approximative Analysis of Stochastic Processes*. Samara: SNTs RAN, 2001, 380 p. (In Russ.)
3. Terekhov S.A. Neural Network Approximations of Probability Density in Information Modeling Tasks. *Nejroinformatika–2002: materialy IV Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferencii*. Moscow: MIFI, 2002, pp. 94–120. (In Russ.)

4. Lyozina I.V. Approximative Analysis of Distribution Laws with Orthogonal Polynomials and Neural Network Models: diss. ... cand. tech. sciences. Samara, 2012, 108 p. (In Russ.)
5. Hajkin S. *Neural Networks*: 2nd Ed., recycled. Transl. From English. Moscow: ООО «I.D. Vil'yams», 2006, 1104 p. (In Russ.)
6. Osovskij S. *Neural Networks for Information Processing*. Transl. From Poland. Moscow: Finansy i statistika, 2002, 344 p. (In Russ.)
7. Bezdek J.C., Ehrlich R., Full W. FCM: The fuzzy c-means clustering algorithm. *Computers and geosciences*, 1984, vol.10, no. 2–3, pp. 191–203.
8. Tarasenko L. Supervised and unsupervised learning in radial basis function classifiers. *IEEE Proceedings – Vision, Image and Signal Processing*, 1994, no. 4, pp. 210–216.
9. Györfi L., Devroye L. *Nonparametric Density Estimation: The L1-View*. Transl. From English. Moscow: Mir, 1988, 408 p. (In Russ.)
10. Tarasov A.A., Lyozina I.V. A study of the approximative capabilities of a fuzzy perceptron using various kernel functions. *Perspektivnye informacionnye tekhnologii (PIT–2020): materialy mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii*. Samara: Izd-vo SNTs RAN, 2020, pp. 61–63. (In Russ.)
11. Kolmogorov A.N. *Theory of Probability and Mathematical Statistics*. Moscow: Nauka, 1986, 535 p. (In Russ.)

Received 07.11.2023

УДК 519.876.5

ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ КАМЕР СИСТЕМЫ КРУГОВОГО ОБЗОРА НА БЕСПИЛОТНЫЙ КАРЬЕРНЫЙ САМОСВАЛ

Сыркин И.С., Дубинкин Д.М., Садовец В.Ю.

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, Кемерово, РФ.

E-mail: syrkin@kuzstu.ru

Выбор места установки оборудования на бортах беспилотного транспортного средства, а особенно такого как карьерный самосвал, является сложной задачей, которая решает, как правило интуитивно и методом натурального моделирования. Авторы статьи решили сформулированную задачу по обоснованию выбора мест расстановки сенсорики на карьерном самосвале, используя разработанное специализированное программное приложение. Инструментом для проведения исследований был выбран симулятор Carla simulator, как обладающий широкими возможностями по визуализации окружающего мира. На начальном этапе выбора расположения расстановки камер, были сформулированы требования к углам их обзора и качеству получаемого от них изображения. Это потребовало разработки программного приложения на языке Python с использованием библиотеки Open3D, выбор которого обоснован тем, что симулятор Carla simulator предоставляет доступ к своему API (Application Programming Interface) через библиотеку для этого языка, а также потому, что он позволяет быстро создавать прототипы приложений. Разработанное программное приложение помогает пользователю выбрать расположение видеокамер на карьерном самосвале для очувствления системы беспилотного управления. Дальнейшие исследования направлены на автоматизацию выбора точек установки видеокамер на борту беспилотного карьерного самосвала.

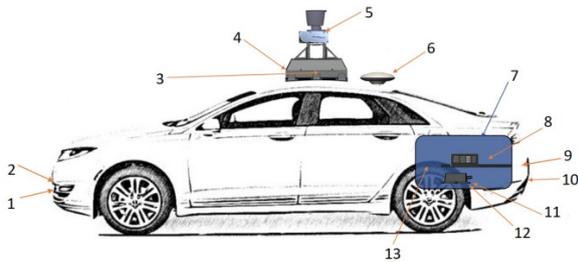
Ключевые слова: *система кругового обзора, карьерный самосвал, сенсор, симулятор*

Введение

Разработкой беспилотных транспортных средств в настоящее время занимаются ведущие производители, как в области автомобилестроения, так и в направлении информационных технологий. Беспилотные транспортные средства, предназначены для повышения безопасности перемещения по дорогам общего пользования, а также по пересеченной местности, в сложных климатических условиях и в условиях добычи полезных

ископаемых открытым способом [1–5]. Создание беспилотного транспорта требует установки на него большого количества дополнительного оборудования – датчиков и вычислительных блоков, которые способны принимать решения по управлению транспортным средством, в зависимости от дорожной обстановки. К первой группе оборудования относятся радары, лидары, камеры, ко второй – вычислительные блоки на базе персональных компьютеров, промышленных компьютеров и прочих [6–7].

Каждый разработчик предлагает оригинальное размещение оборудования для беспилотного управления на легковом автомобиле, обычно основанное на простой интуиции и возможностях беспилотного оборудования. Например, компания Tesla в своих автомобилях отказывается от использования лидаров, считая достаточным применение камер и радаров [8–10]. Разработчик фреймворка Apollo для создания беспилотников, компания Baidu в документации к проекту приводит рекомендуемое размещение оборудования, представленное на рисунке 1, а схема установки от разработчика StarLine представлена на рисунке 2.



1 – Radar; 2 – LiDAR (16); 3 – Side Cameras; 4 – Front Cameras; 5 – 128L Lidar; 6 – GPS Antenna; 7 – Inside of the Trunk; 8 – Industrial PC; 9 – Radar; 10 – 16L Lidar; 11 – GPS Receiver; 12 – IMU; 13 – 16L Lidar.

Рисунок 1. Расположение датчиков для фреймворка Apollo [11]

Расстановку камер и лидаров на легковом автомобиле можно логически обосновать удобством наблюдения и максимальным охватом окружающей обстановки. Например, в большинстве проек-

тов беспилотных автомобилей Лидар располагается на крыше автомобиля.

Установка дополнительного оборудования на карьерный самосвал связана с его конструктивными и техническими особенностями [13; 14]. Особенно остро стоит задача в рациональном размещении видеокамер, лидаров и элементов технического зрения на борту беспилотного карьерного самосвала [15; 16].

Постановка цели

В связи с вышеизложенным, целью работы является обоснованный выбор расположения видеокамер для создания системы кругового обзора беспилотного карьерного самосвала.

Выбор и обоснование необходимого оборудования можно выполнить путем логического обоснования, однако всегда требуется убедиться в правильности выбора. Проверка правильности расстановки оборудования на борту транспортного средства возможна двумя способами – натурным моделированием и имитационным.

При натурном моделировании на построенную модель транспортного средства устанавливают приобретенное оборудование и производят проверку правильности своих предположений. Зачастую в первоначальные предположения о местах установки оборудования и выбора его характеристик вносятся корректировки. Это в свою очередь приводит к приобретению дополнительного оборудования с подобными характеристиками или переработке узлов крепления сенсорики

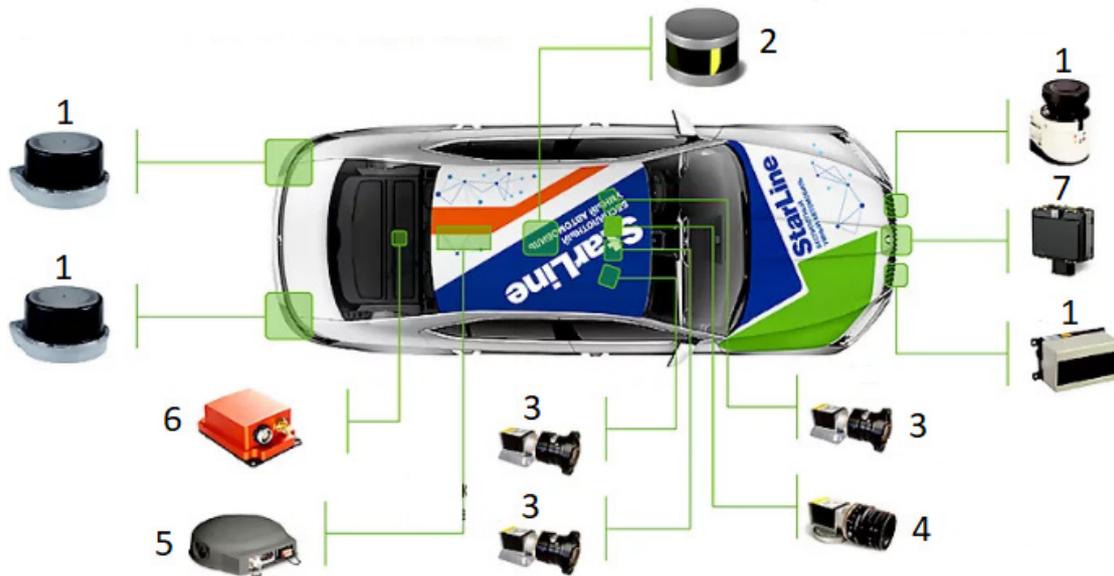


Рисунок 2. Расположение датчиков для автомобиля StarLine [12]

1 – LiDAR 2D+; 2 – LiDAR 3D; 3 – Видеокамера с объективом 6 мм; 4 – Видеокамера с объективом 25 мм; 5 – RTK GNSS; 6 – Инерциальный датчик; 7 – Radar;

к автомобилю. Оба этих фактора являются интуитивными и требуют дополнительных финансовых затрат для изготовителя беспилотного автомобиля, поскольку возникает необходимость перепроектировать большое число компонентов. В случае разработки системы беспилотного управления карьерным самосвалом способом натурального моделирования становится практически не реализуемой задачей, вследствие его конструктивных и технологических особенностей.

Гораздо дешевле, быстрее и эффективнее для первоначального обоснования выбора и расстановки оборудования использовать имитационное моделирование.

Имитационное моделирование возможно несколькими способами, один из которых основан на CAD (Computer Aided Design – системы автоматизированного проектирования) программах, применяемого при разработки конструкторской документации на изготовление транспортного средства. В большинстве крупных CAD систем есть модули визуализации, которые позволяют создать сцену с готовыми объектами, камерами, источниками освещения. Работа с подобными модулями удобна, но не годится для достижения цели, поставленной в этой работе. Основная причина заключается в том, что из всех существующих классов устройств оучувствления беспилотных автомобилей (камер, лидаров, радаров) доступны для имитационного моделирования только камеры. Радары и лидары невозможно быстро и просто симулировать в существующих CAD системах, с использованием всех их возможностей, включая модули визуализации.

Описание применяемых технологий

Решение задачи симуляции радаров, лидаров, камер, установленных на беспилотных автомобилях, возможно с использованием специального класса программного обеспечения, симуляторов беспилотных автомобилей. Среди них можно перечислить Carla simulator, Udacity's car simulator, «SVL simulator» и некоторые другие [14; 16; 17]. Каждый из этих симуляторов позволяет размещать виртуальную модель автомобиля в виртуальную дорожную среду, располагать на автомобиле датчики и подавать на него управляющие воздействия для перемещения.

Решение задачи оценки расстановки сенсорики проводилось с использованием симулятора Carla simulator [14]. Внешний вид модели карьерного самосвала, установленного на проезжей части, приведен на рисунке 3.

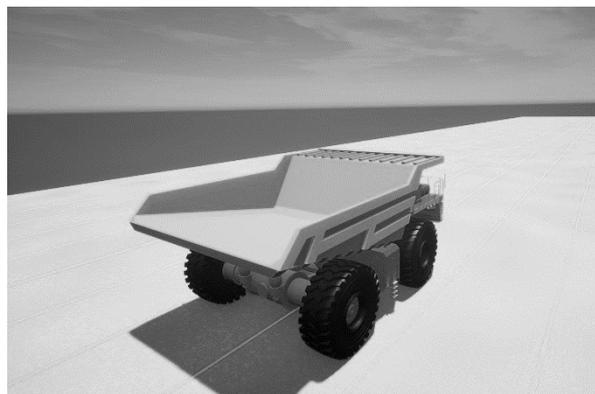


Рисунок 3. Внешний вид самосвала

Симулятор Carla позволяет взаимодействовать с симулируемым миром из сторонних приложений посредством API (Application Programming Interface) – программный интерфейс приложения). Основой Carla API является набор встроенных объектов, которые предоставляют возможность взаимодействия исследуемого объекта с отдельными элементами симулируемого мира. Представленный программный интерфейс позволяет настраивать режимы симуляции (синхронный, асинхронный, с визуализацией или без визуализации), есть возможность добавления автомобилей, размещения на них различных датчиков (камер, радаров, лидаров, навигации). Решение задачи обоснования выбора мест расстановки сенсорики на самосвале потребовало разработки специализированного приложения, внешний вид которого приведен на рисунке 4.

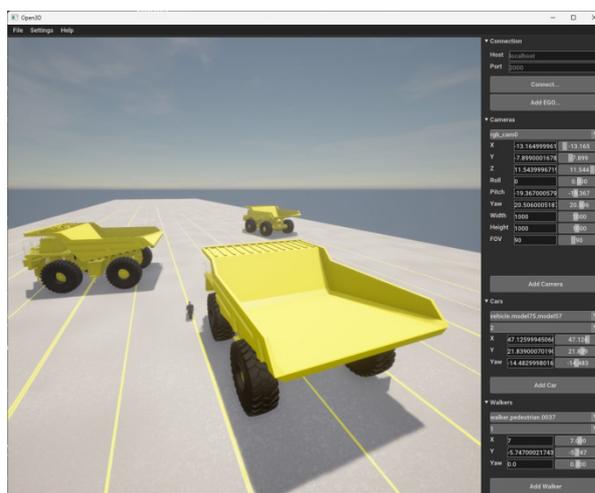


Рисунок 4. Внешний вид интерфейса разработанной программы

Приложение написано на языке Python с использованием библиотеки Open3D [15].

Выбор языка программирования Python был обоснован тем, что симулятор предоставляет доступ к своему API через библиотеку для этого языка, а также потому, что он позволяет быстро соз-

давать прототипы приложений. Сам язык Python не предоставляет стандартных возможностей реализации GUI (Graphical User Interface – графический пользовательский интерфейс). Создание визуальных приложений требует использования дополнительных библиотек, например PyGame или Open3D. Последняя была выбрана исходя из возможностей расширения разрабатываемого приложения путем визуализации данных от дополнительных датчиков (лидара, радара). Библиотека Open3D позволяет стандартными средствами выводить в окно приложения как обычные растровые изображения, так и трехмерные объекты, в том числе облака точек, линии, полигоны с возможностью текстурирования и настройки освещения.

Особенность библиотеки Open3D заключается в том, что проектирование пользовательского интерфейса выполняется путем написания исходного кода, а не с применением визуальных средств проектирования GUI, на подобии Visual Studio от Microsoft.

Выбор расположения и ориентации видеокamer можно осуществить путем логического обоснования. Для примера, камера переднего обзора должна находиться по оси автомобиля, направлена вперед. Искажения перспективы на изображении отсутствуют при углах обзора 90° . Пример изображения, полученного с такой камеры, представлен на рисунке 5.



Рисунок 5 Изображение с камеры переднего обзора

Важной задачей создания системы технического зрения для беспилотного карьерного самосвала является изготовление и настройка системы кругового обзора, предназначенной для передачи видео от самосвала в дистанционный пункт управления. В данном случае оператор может оценить окружающую обстановку вокруг самосвала и принять решение о продолжении работы машины или подать команду на аварийную остановку.

Важным требованием, предъявляемым к системе кругового обзора, является угол обзора. По

горизонтали он должен составлять полные 360° , по вертикали стремиться к 90° . Выходными данными в результате работы программы будут параметры камер (угол обзора, фокусное расстояние), координаты их расположения на модели карьерного самосвала и их ориентация в пространстве. Эти требования будут лежать в основе проектирования компоновки облика карьерного самосвала, построения сборочных чертежей системы кругового обзора и схемы прокладки кабелей для подключения оборудования.

Выбор расстановки камер системы кругового обзора начинается с создания сцены, имитирующей окружающую обстановку, когда вокруг самосвала расположены другие объекты. Пример такой сцены представлен на рисунке 6.

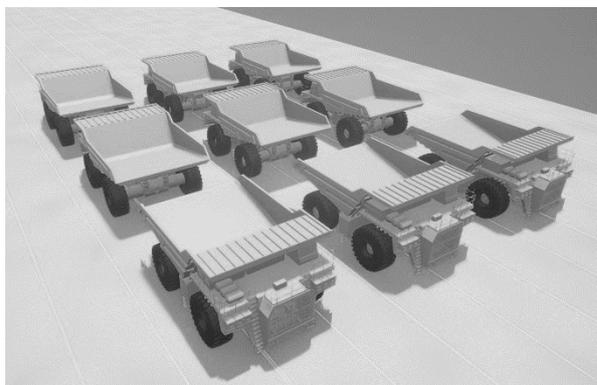


Рисунок 6. Сцена для исследования системы кругового обзора

Камеры, выдающие изображения без значительных искажений изображения обладают полем зрения до 120° , что можно задать в исследуемой модели. В этом случае изображение с камеры, установленной на палубе самосвала, будет представлено на рисунке 7.

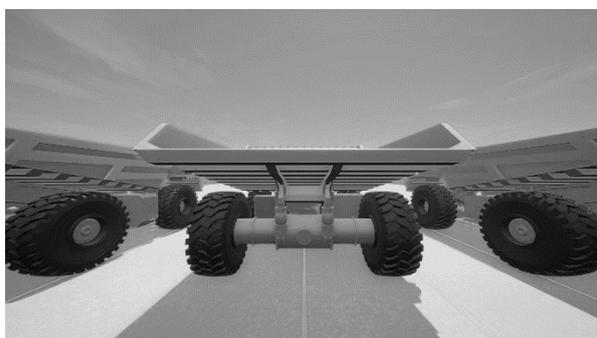


Рисунок 7. Изображение с передней камеры

Видно, что боковые самосвалы не полностью попадают в поле зрения камеры. Расширение поля зрения системы возможно лишь путем добавления новых камер, что показано на рисунке 8.



Рисунок 8. Изображение с угловой камеры

После установки дополнительной камеры на углу палубы, в поле зрения системы не попадает лишь часть пространства непосредственно за карьерным самосвалом, что можно исправить путем установки дополнительной камеры под грузовой платформой. Итоговое поле зрения системы кругового обзора, состоящей из передней, задней камеры и сдвоенных угловых камер, приведено на рисунке 9.

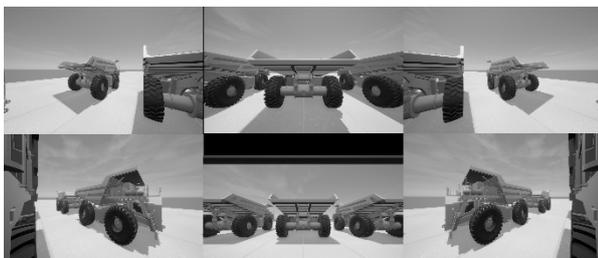


Рисунок 9. Изображения со всех камер системы кругового обзора

Выводы

В результате выполненной работы была разработана программа на языке Python [18; 19], которая взаимодействует с Carla симулятором и помогает пользователю выбрать расположение видеокамер на карьерном самосвале для очувствления системы беспилотного управления. Как показали исследования, создание системы кругового обзора формирует определенные технические требования к применяемым камерам. Технические характеристики камер влияют на точки расстановки их на карьерном самосвале, а также на их количество. Дальнейшие исследования направлены на автоматизацию выбора точек установки видеокамер на борту беспилотного карьерного самосвала.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по соглашению от 30.09.2022 №075-15-2022-1198 с ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» в рамках Комплексной научно-технической программы полного инно-

вационного цикла «Разработка и внедрение комплекса технологий в областях разведки и добычи твердых полезных ископаемых, обеспечения промышленной безопасности, биоремедиации, создания новых продуктов глубокой переработки из угольного сырья при последовательном снижении экологической нагрузки на окружающую среду и рисков для жизни населения» (КНТП «Чистый уголь – Зеленый Кузбасс») в рамках реализации мероприятия «Разработка и создание беспилотного карьерного самосвала челночного типа грузоподъемностью 220 тонн» в части выполнения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

Литература

1. Bakhaev P. Automated control of unmanned truck for transport complex of mining industry // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1333. P.052001. DOI:10.1088/1742-6596/1333/5/052001
2. Assessment of the Need to Create Control System of Unmanned Dump Truck / D. Dubinkin [et al.] // *E3S Web of Conferences*. 2020. P. 1–16.
3. Vehicle Control of Unmanned Dump Trucks / Y. Okawa [et al.] // *SAE Transactions*. 1992. Vol. 101. P. 292–299.
4. Концепция управления беспилотными транспортными средствами в условиях открытых горных работ / И.В. Чичерин [и др.] // *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. 2020. № 8. С. 109–120. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-8-109-120
5. Чичерин И.В., Федосенков Б.А. Формирование сигналов текущих траекторий в автоматизированной системе модального управления движением беспилотных транспортных средств в условиях открытых горных работ // *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика*. 2021. № 4. С. 35–44. DOI: 10.24143/2072-9502-2021-4-35-44
6. Shadrin S.S., Ivanov A.M., Varlamov O.O. Experimental autonomous road vehicle with logical artificial intelligence // *Journal of Advanced Transportation*. 2017. Vol. 2017. P. 2492765. DOI: 10.1155/2017/2492765
7. Increasing the technical level of mining haul trucks / Yu. Voronov [et al.] // *E3S Web of Conferences: The Second International Innovative Mining Symposium. Kemerovo, 2017. Vol. 21. P. 30151.1–30151.6. DOI: 10.1051/e3sconf/20172103015*
8. Measures, performance assessment, and enhancement of TFDs / B. Boashash [et al.] //

- Time-Frequency Signal Analysis and Processing: A Comprehensive Reference. 2015. P. 387–452. DOI 10.1016/B978-0-12-398499-9.00007-8
9. Гудвин Г.К., Гребе С.Ф., Сальгадо М.Э. Проектирование систем управления. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2004. 911 с.
 10. Концепция управления беспилотными транспортными средствами в условиях открытых горных работ / И.В. Чичерин [и др.] // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2020. № 8. С. 109–120. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-8-109-120
 11. ApolloAuto/Apollo. URL: https://github.com/ApolloAuto/apollo/blob/master/docs/02_Quick%20Start/demo_guide/images/Hardware_overview_3_5.png (дата обращения: 12.10.2023).
 12. Как устроен беспилот StarLine. URL: <https://bespilot.com/images/art-4725.jpg> (дата обращения: 12.10.2023).
 13. Karpathy A. CVPR 2021 Workshop on Autonomous Vehicles. 2021. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=NSDTZQdo6H8> (дата обращения: 22.03.2022).
 14. Дубинкин Д.М., Аксенов В.В., Пашков Д.А. Тенденции развития беспилотных карьерных самосвалов // Уголь. 2023. № 6(1168). С. 72–79. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-6-72-79
 15. Масленников Д.В., Сыркин И.С. Анализ и сравнение симуляторов Carla и LGSV для обучения беспилотных автомобилей // Россия молодая: материалы XIII Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых. Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2021. С. 31517.1–31517.4.
 16. CARLA: An Open Urban Driving Simulator / A. Dosovitskiy [et al.] // Proceedings of the 1st Annual Conference on Robot Learning. 2017. P. 1–16.
 17. Zhou Q.-Y., Park J., Koltun V. Open3D: A Modern Library for 3D Data Processing. URL: <https://arxiv.org/pdf/1801.09847v1.pdf> (дата обращения: 25.08.2023).
 18. Модуль расстановки видеокамер на карьерном самосвале: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2023665572. Российская Федерация № 2023664281 / И.С. Сыркин, Д.М. Дубинкин, И.Ф. Юнусов, Р.Р. Гарифуллин, И.Р. Дильмухаметов; заявл. 05.07.2023; опубл. 18.07.2023.
 19. Модуль калибровки видеокамеры: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2023669218 Российская Федерация. № 2023667823 / Р.Р. Гарифуллин, Д.М. Дубинкин, И.С. Сыркин, А.А. Васина, И.Ф. Юнусов; заявл. 28.08.2023; опубл. 12.09.2023.

Получено 24.10.2023

Сыркин Илья Сергеевич, к.т.н., доцент кафедры информационных и автоматизированных производственных систем (ИиАПС) Кузбасского государственного технического университета имени Т.Ф. Горбачева (КузГТУ). 650000, Российская Федерация, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28. Тел. +7 903 909-24-91. E-mail: syrkin@kuzstu.ru

Дубинкин Дмитрий Михайлович, к.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник научного центра «Цифровые технологии» КузГТУ. 650000, Российская Федерация, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28. Тел. +7 913 405-94-11. E-mail: ddm.tm@kuzstu.ru

Садовец Владимир Юрьевич, к.т.н., доцент, доцент кафедры ИиАПС КузГТУ. 650000, Российская Федерация, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28. Тел. +7 950 263-84-75. E-mail: svyu.pmh@kuzstu.ru

SELECTION AND JUSTIFICATION OF THE LOCATION OF CAMERAS OF THE ALL-ROUND VISION SYSTEM ON AN UNMANNED DUMP TRUCK

Syrkin I.S., Dubinkin D.M., Sadovets V.Yu.

Gorbachev's Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russian Federation

E-mail: syrkin@kuzstu.ru

The choice of equipment installation location on the sides of an unmanned vehicle, and especially such a dump truck, is a difficult task, which is solved, as a rule, intuitively and by the method of full-scale modeling. The authors of the article have solved the formulated problem, on substantiation of the choice of places of sensorics arrangement on the dump truck, using the developed specialized software

application. The Carla simulator was chosen as a tool for carrying out the research as it has wide possibilities of visualization of the surrounding world. At the initial stage of selecting the location of the camera arrangement, the requirements for their viewing angles and the quality of the image obtained from them were formulated. This required the development of a software application in the Python language using the Open3D library, the choice of which is justified by the fact that the Carla simulator provides access to its API through a library for this language, and also because it allows rapid prototyping of applications. The developed software application helps the user to select the location of the video cameras on the dump truck in order to experience the unmanned control system. Further research is aimed at automating the selection of camera locations on board an unmanned dump truck.

Keywords: *all-round vision system, dump truck, sensor, simulator*

DOI: 10.18469/ikt.2023.21.2.10

Syrkin Ilya Sergeevich, Gorbachev's Kuzbass State Technical University, 28, Vesennaya Street, Kemerovo, 650000, Russian Federation; Associate Professor of Information and Automated Production Systems Department, PhD in Technical Sciences. Tel. +7 903 909-24-91. E-mail: syrkin@kuzstu.ru

Dubinkin Dmitry Mikhailovich, Gorbachev's Kuzbass State Technical University, 28, Vesennaya Street, Kemerovo, 650000, Russian Federation; Leading Research Associate of the Digital Technologies Research Center, PhD in Technical Sciences, Associate Professor. Tel. +7 913 405-94-11. E-mail: ddm.tm@kuzstu.ru

Sadovets Vladimir Yuryevich, Gorbachev's Kuzbass State Technical University, 28, Vesennaya Street, Kemerovo, 650000, Russian Federation; Associate Professor of Information and Automated Production Systems Department, PhD in Technical Sciences, Associate Professor. Tel. +7 950 263-84-75. E-mail: svyu.pmh@kuzstu.ru

References

1. Bakhaev P. Automated control of unmanned truck for transport complex of mining industry. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1333, pp. 052001. DOI: 10.1088/1742-6596/1333/5/052001
2. Dubinkin D. et al. Assessment of the Need to Create Control System of Unmanned Dump Truck. *E3S Web of Conferences*, 2020, pp. 1–16.
3. Okawa Y. et al. Vehicle Control of Unmanned Dump Trucks. *SAE Transactions*, 1992, vol. 101, pp. 292–299.
4. Chicherin I.V. et al. The concept of controlling the unmanned vehicles in open pit mining. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*, 2020, no. 8, pp. 109–120. DOI:10.21440/0536-1028-2020-8-109-120 (In Russ.)
5. Chicherin I.V., Fedosenkov B.A. Forming signals of current trajectories in computer-aided system of modal controlling unmanned vehicles in open pit mining. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika*, 2021, no. 4, pp. 35–44. DOI 10.24143/2072-9502-2021-4-35-44 (In Russ.)
6. Shadrin S.S., Ivanov A.M., Varlamov O.O. Experimental autonomous road vehicle with logical artificial intelligence. *Journal of Advanced Transportation*, 2017, vol. 2017, pp. 2492765. DOI: 10.1155/2017/2492765
7. Voronov I Yu. et al. Increasing the technical level of mining haul trucks. *E3S Web of Conferences: The Second International Innovative Mining Symposium*. Kemerovo, 2017, vol. 21, pp. 3015.1–3015.6. DOI: 10.1051/e3sconf/20172103015
8. Boashash B. et al. Measures, performance assessment, and enhancement of TFDs. *Time-Frequency Signal Analysis and Processing: A Comprehensive Reference*, 2015, pp. 387–452. DOI: 10.1016/B978-0-12-398499-9.00007-8
9. Gudvin G.K., Grebe S.F., Sal'gado M.E. *Control system design*. Moscow: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2004, 911 p. (In Russ.)
10. Chicherin I.V. et al. The concept of controlling the unmanned vehicles in open pit min-

- ing. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Gornyj zhurnal*, 2020, no. 8, no. 109–120. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-8-109-120 (In Russ.)
11. ApolloAuto/Apollo. URL: https://github.com/ApolloAuto/apollo/blob/master/docs/02_Quick%20Start/demo_guide/images/Hardware_overview_3_5.png (accessed: 12.10.2023).
 12. How the drone works StarLine. URL: <https://bespilot.com/images/art-4725.jpg> (accessed: 12.10.2023).
 13. Karpathy A. CVPR 2021 Workshop on Autonomous Vehicles, 2021. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=NSDTZQdo6H8> (accessed: 22.03.2022).
 14. Dubinkin D.M., Aksenov V.V., Pashkov D.A. Trends in the development of unmanned mining dump trucks. *Ugol'*, 2023, no. 6(1168), pp. 72–79. DOI 10.18796/0041-5790-2023-6-72-79 (In Russ.)
 15. Maslennikov D.V., Syrkin I.S. Analysis and comparison of Carla and LGSV simulators for training self-driving cars. *Rossiya molodaya: materialy XIII Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii molodyh uchenyh*. Kemerovo: Kuzbasskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet imeni T.F. Gorbacheva, 2017, p. 1–16. (In Russ.)
 16. Dosovitskiy A. et al. CARLA: An Open Urban Driving Simulator. *Proceedings of the 1st Annual Conference on Robot Learning*, 2017, pp. 1–16.
 17. Zhou Q.-Y., Park J., Koltun V. Open3D: A Modern Library for 3D Data Processing. URL: <https://arxiv.org/pdf/1801.09847v1.pdf> (accessed: 25.08.2023).
 18. Video camera placement module on a quarry dump truck: svidetel'stvo o gos. registratsii programmy dlja EVM 2023665572. Russian Federation. No.2023664281 / I.S. Syrkin, D.M. Dubinkin, I.F. Yunusov, R.R. Garifullin, I.R. Dilmukhametov; dec. 05.07.2023; publ. 18.07.2023. (In Russ.)
 19. Camera calibration module: svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlja EVM 202366921. Russian Federation. No 2023667823 / R.R. Garifullin, D.M. Dubinkin, I.S. Syrkin, A.A. Vasina, I.F. Yunusov; dec. 28.08.2023; publ. 12.09.2023. (In Russ.)

Received 24.10.2023

ТЕХНОЛОГИИ КОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМ И СЕТЕЙ

УДК 621.396.2

РЕАЛИЗАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ РАДИОСВЯЗИ

Графкин А.В., Цветов В.П., Луканов А.С.

*Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, РФ
E-mail: lukanov.as@ssau.ru*

На сегодняшний день важнейшей компонентой метода математического моделирования, который эффективно используется для решения современных прикладных задач, являются современные информационные технологии, позволяющие не только накапливать практически неограниченные объемы экспериментальной информации, но и анализировать эти данные с помощью средств визуализации. В статье рассматриваются вопросы, посвященные проектированию и реализации распределенной вычислительной системы, позволяющей моделировать и анализировать массовые эксперименты для передачи данных в случае использования многочастотных систем связи. В качестве моделей источников сообщений используются модели сигналов с максимальной энтропией. В качестве модели канала связи с шумами используется канал с аддитивным гауссовским шумом, имеющим равномерный спектр в заданной полосе частот. Реализованная вычислительная система позволяет таблично и визуально анализировать такие параметры массовых экспериментов как число поднесущих сигнала, диапазон временного отрезка для восстановления сигнала, отношение сигнал/шум, квадратурную и синфазную составляющие QAM сигнала, энергетическую и информационную характеристики сигнала скорость передачи информации по каналу связи. Результаты серии экспериментов иллюстрируются интерактивными графиками с анимационными эффектами.

Ключевые слова: метод математического моделирования, базы данных, информационная система, массив экспериментов, сигнально-кодовая конструкция, наложение шума на сигнал, восстановление сообщения по модели зашумленного непрерывного сигнала

Введение

Современные информационные технологии превратили метод математического моделирования в еще более мощный инструмент, позволяющий ставить и решать сложные прикладные задачи. Одной из таких актуальных задач является надежная и эффективная (высокоскоростная) передача данных по каналам радиосвязи.

Для решения данной задачи спроектирована и реализована распределенная вычислительная система (РВС), которая на основе технологий баз данных позволяет накапливать информацию, сгенерированную в процессе проведения экспериментов. А стек технологий построения распределенных вычислительных систем позволил создать распределенную систему для выполнения серий экспериментов на основе запрограммированных математических моделей, которые составляют ядро системы.

Традиционными показателями качества систем радиосвязи (СРС) являются информационная и энергетическая эффективность [3; 5–10]. Информационная эффективность определяется как:

$$\eta = \frac{R}{C},$$

где R – скорость передачи информации системой связи, C – пропускная способность канала (по Шеннону). Информационная эффективность показывает, какую долю пропускной способности канала использует система радиосвязи.

Энергетическая эффективность определяется как

$$\beta = \frac{R}{\frac{P_c}{N_0}},$$

где P_c – средняя мощность сигнала, N_0 – спектральная плотность шума, для аддитивного белого гауссовского шума (АБГШ):

$$N_0 = \frac{P_w}{F},$$

где P_w – средняя мощность шума, F – используемая полоса частот канала связи. Энергетическая эффективность имеет смысл удельной скорости, количества бит/с, приходящихся на 1 Вт мощности сигнала, отнесенных к спектральной плотности шума, и показывает, насколько эффективно с точки зрения обеспечения скорости передачи данных используются энергетические характеристики системы связи.

Одним из способов повышения эффективности СРС является разработка и применение подходов сигнально-кодовых конструкций (СКК).

В информационной системе в качестве базы для сравнения информационной и энергетической эффективности систем радиосвязи с различными сигнально-кодовыми конструкциями используется математическая модель системы радиосвязи с ортогональным многочастотным сигналом и квадратурной амплитудной модуляцией (ОМЧС-КАМ).

В качестве исследуемой (базовой) СКК взята математическая модель ОМЧС-КАМ на основе дискретного косинус-преобразования и дискретного синус-преобразования (ОМЧС-КАМ-ДКП4-ДСП4).

Анализ предметной области

В результате анализа предметной области по восстановлению (распознаванию) сигнала на основе модели КАМ-ОЧМ модуляции входного сигнала, при прохождении его через зашумленный канал, были выделены следующие основные сущности [3; 5–8]:

Алфавит – фиксированная конечная совокупность символов.

Сообщение – представление информации в виде упорядоченного набора символов алфавита.

Источник сообщений – множество сообщений конечной длины с определенной на нем вероятностной мерой.

Кодирование (источника) сообщений – преобразование исходного сообщения, составленного из символов алфавита источника, в (канальное) сообщение, составленное из (кодовых) символов (канального) алфавита передающего устройства.

Кодовая конструкция – совокупность способов преобразования кодовой комбинации сообщения с помощью помехоустойчивых и манипуляционных кодов в передатчике и способов выявления и коррекции ошибок при приеме.

Сигнальная конструкция – совокупность функций-носителей информации, составляющих многопозиционный многочастотный сигнал, способа организации многочастотного сигнала из функций-носителей во времени, способов нанесения на них сообщения (манипуляции) в передатчике и способов извлечения сообщения из функций-носителей (деманипуляции) в приемнике.

Функция-носитель – функция $f(t, \alpha, \beta, \dots)$, которой описывается сигнал, несущий передаваемую информацию.

Передающее устройство – совокупность технических средств, предназначенных для преобразования сообщения в сигнал.

Сигнал – физический процесс, измеряемый во времени, значения параметров которого определяют сообщение.

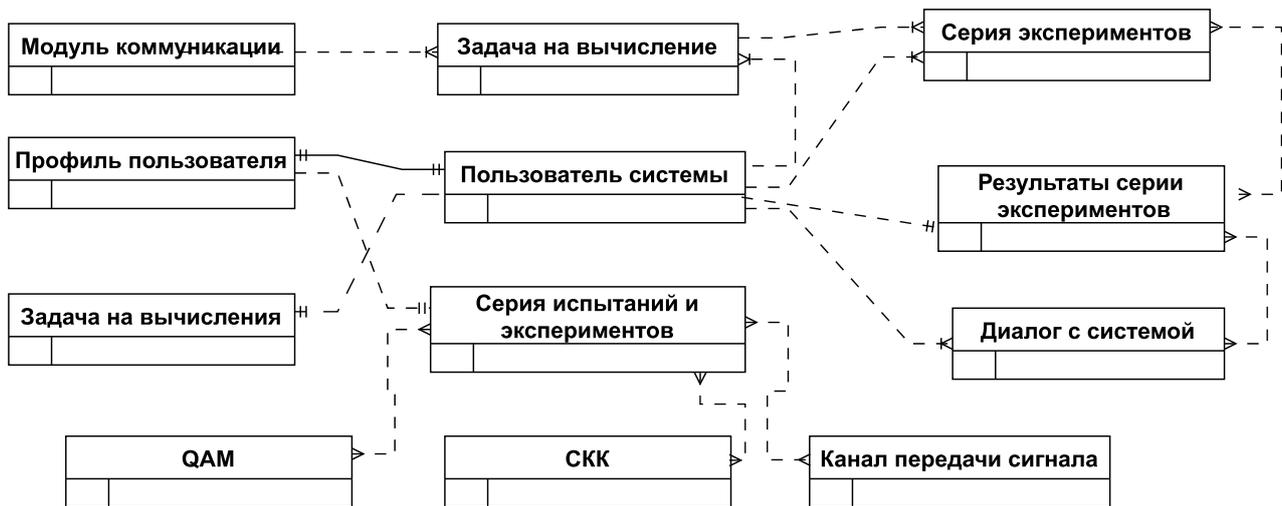


Рисунок 1. Логическая модель базы данных распределенной вычислительной системы

Модуляция/манипуляция сигнала – преобразование канального сообщения в сигнал.

Канал связи – совокупность технических средств, предназначенных для формирования, передачи и приема сигналов, и соответствующих им линий связи. Канал связи является составной частью канала передачи сообщений.

Линия связи – область распространения сигнала.

Шум – случайное изменение характеристик области распространения сигнала, влияющее на параметры передаваемого сигнала.

Параметр физического процесса – доступное для измерения в любой момент времени свойство физического процесса.

Измерение параметра физического процесса – сопоставление параметру физического процесса элемента числового множества.

Приемное устройство – совокупность технических средств, предназначенных для преобразования сигнала в сообщение.

Демодуляция/деманипуляция сигнала – преобразование сигнала в исходное канальное сообщение.

Декодирование сообщений – преобразование сообщения, составленного из символов алфавита приемного устройства, в исходное сообщение.

Испытание – последовательность следующих действий:

- случайный выбор сообщения, генерируемого численной моделью источника сообщений;
- кодирование выбранного сообщения в соответствии с моделью канала связи;
- преобразование выбранного сообщения в численную модель непрерывного сигнала исследуемой СКК;
- наложение шума в соответствии с моделью канала, формирование модели зашумленного непрерывного сигнала исследуемой СКК;

– восстановление (деманипуляция / декодирование) сообщения по модели зашумленного непрерывного сигнала;

– вычисление значений параметров, необходимых для оценки информационной и энергетической эффективности СКК, по переданному и восстановленному сообщениям;

– протоколирование результатов.

Эксперимент – последовательность испытаний. По результатам экспериментов вычисляются значения информационной и энергетической эффективности исследуемой СКК.

Концептуальная модель базы данных

На основе выделенных сущностей, спроектирована концептуальная модель базы данных для хранения и последующей обработки экспериментальных данных [4] (рисунок 1).

Пользователь системы – действия оператора осуществляются от имени авторизованного пользователя.

Профиль пользователя – задает реквизиты пользователя, определяет тип учетной записи. Предусмотрены два типа учетных записей: «эксперт» и «оператор». Доступные в системе функции зависят от типа учетной записи.

Задача на вычисление – задача на обработку (вычисление) модулем коммуникации вычислительного этапа эксперимента или испытания. Задача формируется автоматически планировщиком системы. В зависимости от типа задачи планировщик назначает ее доступному модулю коммуникации. В процессе вычисления задача имеет один из перечисленных статусов: «задача не распределена», «задачу готов обработать модуль», «задача обрабатывается модулем», «задача обработана, результат получен», «результат записан в целевую таблицу».

Модуль коммуникации – мультиплатформенное приложение, установленное на вычислительном ресурсе. Основная задача модуля – производить коммуникацию распределенной вычислительной системы с программным, программно-аппаратным или аппаратным модулем, реализующим функции отдельного элемента системы радиосвязи. Элементом может быть устройство, его прототип или математическая модель. Коммуникационный модуль снимает ограничения на операционную систему и язык программирования/среду, в которой реализован элемент. В описываемой системе при вычислениях использовались математические модули, реализованные на языках C++, Python, Matlab, ObjectPascal и др.

Серия экспериментов – позволяет сформировать параметры, указать типы вычислительных модулей, которые будут использоваться на разных этапах моделирования, прототипирования или испытания системы радиосвязи.

Серия испытаний и экспериментов, позволяют задать пакетную обработку. В этом случае указываются диапазоны параметров, для которых необходимо выполнить моделирование, на основе которого планировщик системы автоматически планирует проведение исследований и экспериментов.

Диалог с системой – в системе предусмотрена возможность обсуждения результатов процесса моделирования и вычислений между экспертами системы, а также диалог с администратором РВС.

Модель информационной системы

База данных является составной частью РВС,

позволяющей хранить результаты экспериментов и на их основе проводить оценку информационной и энергетической эффективности исследуемых СКК. Схема функционирования информационной системы изображена на рисунке 2.

Основной функционал информационной системы

При проектировании распределенной информационной системы для генерации и обработки большого массива экспериментальных данных для сравнительного анализа была выбрана наиболее распространенная сигнальная конструкция, построенная на ортогональных многочастотных сигналах с квадратурной амплитудной модуляцией (ОМЧС-КАМ) и использующая обратное и прямое дискретное преобразование Фурье (ДПФ) для нанесения на МЧС сообщения (манипуляции) в передатчике и извлечения сообщения из функций-носителей (деманипуляции) в приемнике.

В процессе экспериментальных исследований проводился сравнительный анализ моделей систем радиосвязи с зашумленным радиоканалом, построенных на основе следующих СКК, с применением манипуляции КАМ:

1. Многочастотные (ортогональные) сигнально-кодовые конструкции ОМЧС-КАМ-ДПФ.
2. Многочастотные (неортогональные) сигнально-кодовые конструкции МЧС-КАМ-ДПФ-Р, получаемые из ОМЧС-КАМ-ДПФ сужением сигналов на интервал $[0, T_0]$, при различных значениях $0,75 T \leq T_0 \leq 0,95 T$.
3. Многочастотные (ортогональные) сигналь-

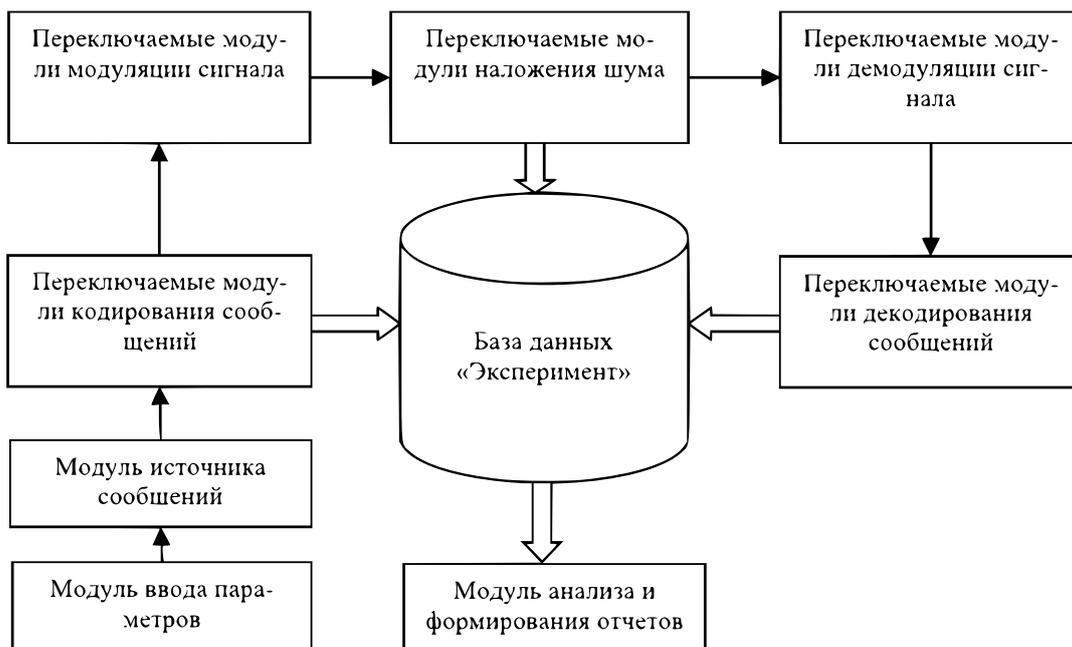


Рисунок 2. Схема функционирования системы

но-кодовые конструкции, использующие для передачи сообщений методы квадратурной амплитудной модуляции и дискретные косинус- и синус-преобразования (ОМЧС-КАМ-ДКП4-ДСП4).

Сравнение исследуемых СКК проводилось на основании следующего критерия их оптимальности:

Наиболее оптимальной, в условиях заданной шумовой обстановки, при равном количестве поднесущих и позиционности КАМ сигнала считается СКК с максимальным показателем информационной эффективности. При равенстве показателей информационной эффективности, сравнению подвергаются показатели энергетической эффективности. При равенстве обоих показателей сравниваемые СКК считаются равноправными.

Для поддержки указанного выше функционала в РВС реализованы следующие основные модули (рисунок 3).

Таким образом, РВС позволяет реализовать следующий основной функционал:

1. Моделирование источника сообщений для исследуемых СКК.
2. Моделирование шума в среде передачи.
3. Моделирование передающего устройства для каждой исследуемой СКК.
4. Моделирование канала связи для заданного ОСШ в среде передачи.
5. Моделирование приемного устройства для каждой исследуемой СКК.
6. Обработка результатов серии экспериментов для каждой исследуемой СКК.

Информационная система имеет распределенную многозвенную клиент-серверную архитектуру (рисунок 4), и реализована по модульному

принципу, что обеспечивает возможность применения различных видов кодирования источника, кодирования канала и модуляции частотных составляющих при формировании СКК.

Система реализована с использованием стека технологий: Nginx 1.1-4.2, Gunicorn, СУБД PostgreSQL 11.0, Python 3.9, Django 4.0.5, Vue.JS, Celery, PySDR, REST API (взаимодействие с вычислительными модулями на Qt, C++ и др.) [1–2].

Архитектура комплекса позволяет распределять нагрузку между вычислительными узлами, как в рамках одной локальной вычислительной сети, так в составе глобальной сетевой инфраструктуры. Информационная система реализована на основе кроссплатформенного (независящего от операционной системы) «толстого» клиента, но, при этом, объем данных, передаваемых между узлами, содержит информацию о небольшом количестве основных параметров компьютерной модели и результатах вычислений, что не оказывает серьезного влияния на сетевой трафик. Все сетевые сеансы в рамках комплекса используют защищенные протоколы передачи данных.

Основной функционал системы развернут на фреймворке Django, где реализуется интерфейс, работа с базой данных, функции взаимодействия с внешними модулями. Планировщик системы реализован на Celery, в нем формируются, а также планируются задачи на проведение экспериментов и испытаний, передаются параметры и обрабатываются результаты вычислений. Задачи распределяются между интерфейсными модулями (модулями коммуникации).



Рисунок 3. Основные модули информационной системы

Выбранная архитектура позволяет пользоваться преимуществами языка Python, расширяет возможности использования в своих проектах сложных алгоритмов за счет большого числа

библиотек и фреймворков (например, PySDR). PySDR позволяет реализовывать проекты с программно-определяемым радио (SDR) и цифровой обработки сигналов (DSP).

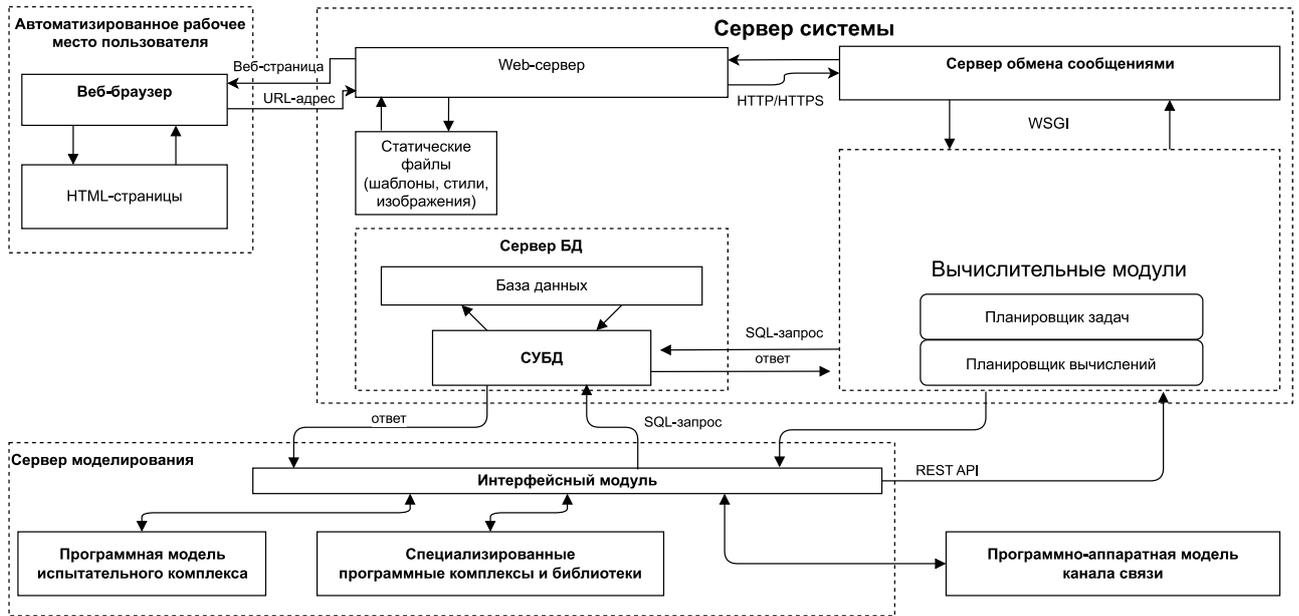


Рисунок 4. Архитектура PBC

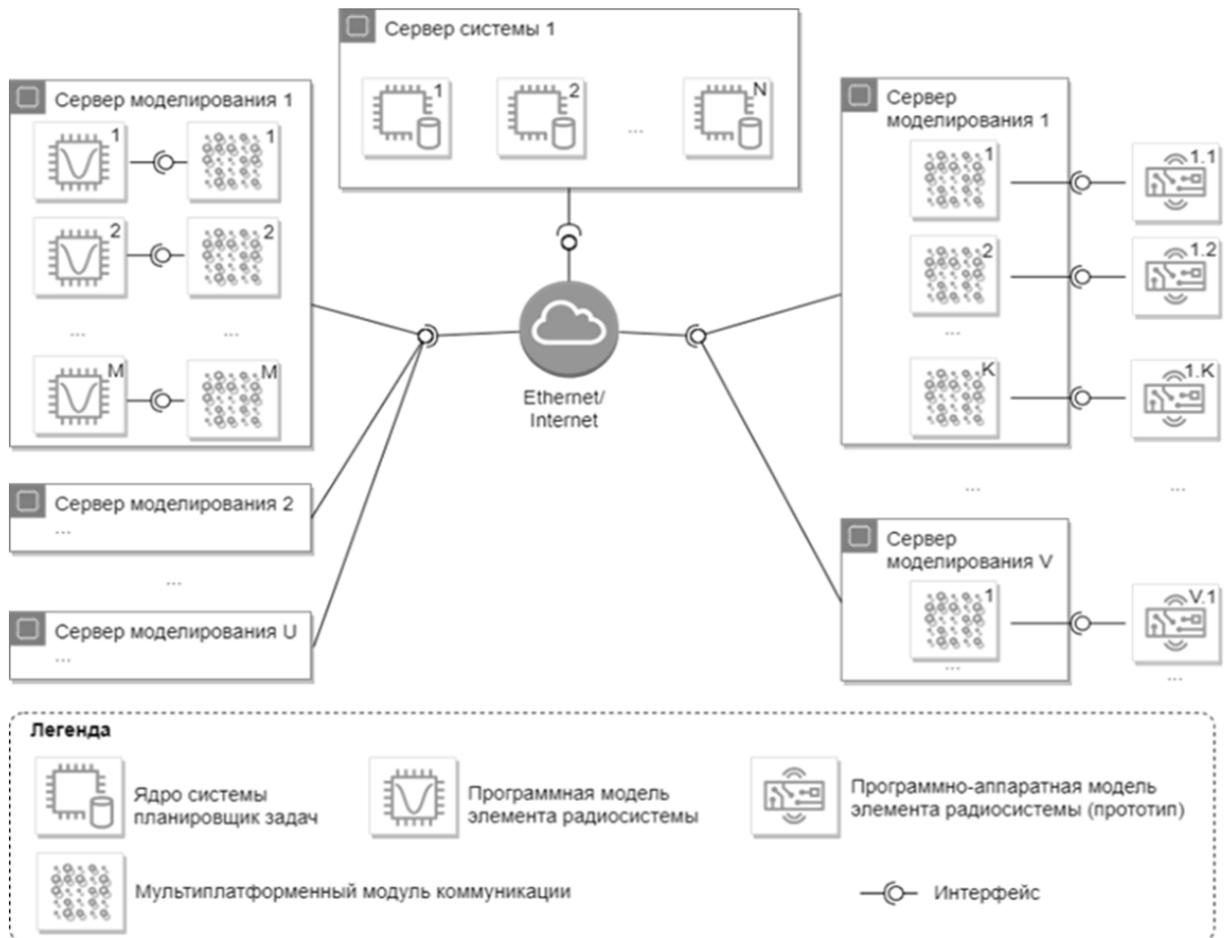


Рисунок 5. Место коммуникационного модуля в распределенной системе

Как видно из рисунка 4, интерфейсный модуль позволяет подключить к системе программные математические модели, специализированные программные комплексы и библиотеки, а также программно-аппаратные модели элементов системы РВС. При взаимодействии с ядром системы используются SQL-запросы к БД и функции REST API ядра. Объединение в единую распределенную вычислительную систему программных модулей, написанных на разных языках, исполняемых на разных вычислительных платформах, стало возможным благодаря модулю коммуникации.

Назначение модуля коммуникации и его место в системе иллюстрируется на рисунке 5.

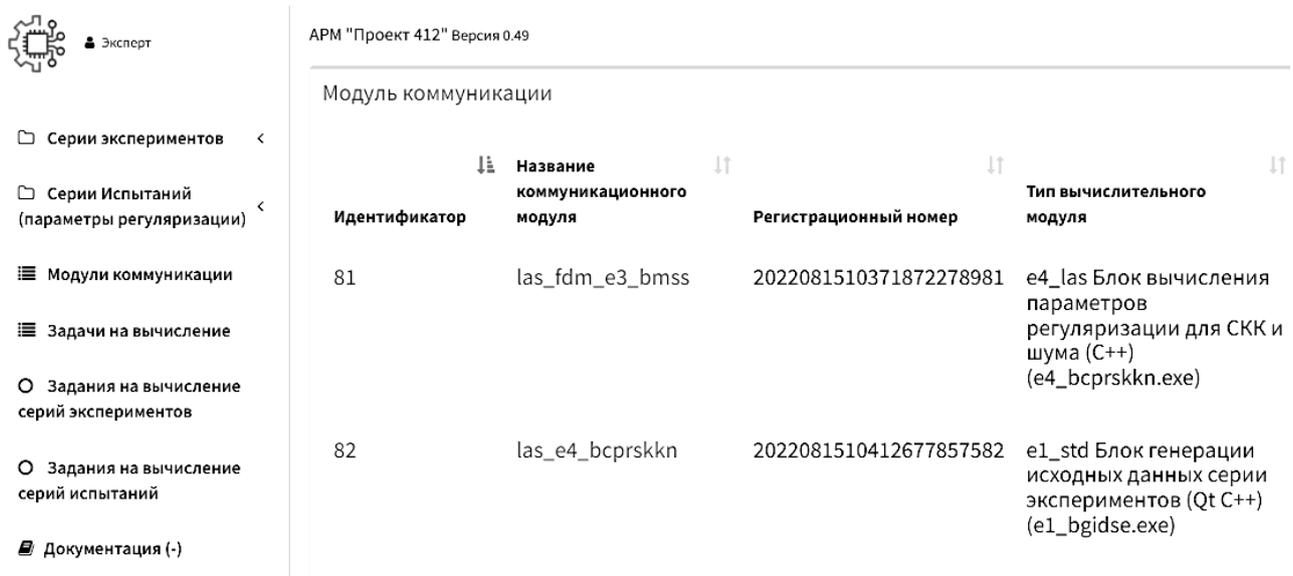
Из рисунка видно, что система позволяет использовать неограниченное количество вычислительных ресурсов, распределенных территориально. Планировщик назначает задачи вычислительным модулям с учетом их статуса.

Коммуникационный модуль, получив задачу, запускает модель элемента на связанных с ним вычислительных ресурсах.

Работа с модулем коммуникации начинается с его регистрации в распределенной системе моделирования: задаются параметры модуля для регистрации на сервере, модуль обращается к серверу для регистрации, после регистрации планировщик системы распределяет задачи на вычисление в соответствии с типами вычислительных модулей (рисунок 6).

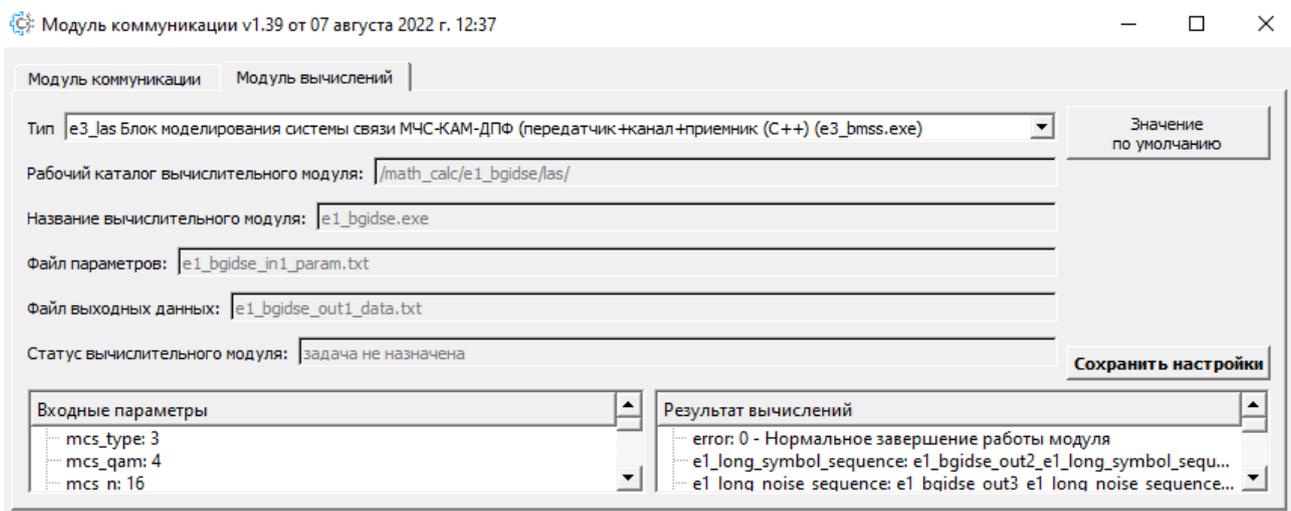
На втором этапе настройки коммуникационного модуля указывается исполнительный код или программно-аппаратный модуль, который будет запускаться на вычисление, когда придет задание от планировщика ядра системы.

На рисунке 7 показаны параметры, которые необходимо настроить, чтобы модуль коммуникации знал, какие задачи, распределенные ядром систе-



Идентификатор	Название коммуникационного модуля	Регистрационный номер	Тип вычислительного модуля
81	las_fdm_e3_bmss	2022081510371872278981	e4_las Блок вычисления параметров регуляризации для СКК и шума (C++) (e4_bcprskkn.exe)
82	las_e4_bcprskkn	2022081510412677857582	e1_std Блок генерации исходных данных серии экспериментов (Qt C++) (e1_bgidse.exe)

Рисунок 6. Регистрация модуля коммуникации



Модуль коммуникации v1.39 от 07 августа 2022 г. 12:37

Модуль коммуникации | Модуль вычислений

Тип: e3_las Блок моделирования системы связи МЧС-КАМ-ДПФ (передатчик+канал+приемник (C++) (e3_bmss.exe)

Рабочий каталог вычислительного модуля: /math_calc/e1_bgidse/las/

Название вычислительного модуля: e1_bgidse.exe

Файл параметров: e1_bgidse_in1_param.txt

Файл выходных данных: e1_bgidse_out1_data.txt

Статус вычислительного модуля: задача не назначена

Значение по умолчанию

Сохранить настройки

Входные параметры

- mcs_type: 3
- mcs_qam: 4
- mcs_n: 16

Результат вычислений

- error: 0 - Нормальное завершение работы модуля
- e1_long_symbol_sequence: e1_bgidse_out2_e1_long_symbol_sequ...
- e1_long_noise_sequence: e1_bgidse_out3_e1_long_noise sequence...

Рисунок 7. Параметры модуля вычислений

мы, можно брать в обработку, какие программные модули запускать, в каком файле брать параметры вычисления и куда записывать результаты.

Настроенный модуль коммуникации постоянно опрашивает сервер и отслеживает очередь задач на вычисление для ассоциированного с ним модуля вычислений. Как только задача появляется в очереди, модуль коммуникации запрашивает у сервера задачу, параметры и входные данные на обработку. Если эту задачу не перехватили другие модули коммуникации, ядро системы задачу назначает ему на исполнение. Теперь задача числится за коммуникационным модулем.

Ядро системы периодически опрашивает состояние модуля коммуникации, который информирует сервер о текущем состоянии: «модуль не доступен», «модуль обрабатывает задачу», «модуль доступен и готов обрабатывать задачи».

Коммуникационный модуль формирует параметры для вычислительного модуля, запускает вычислительный модуль на вычисление (моделирование элемента радиосистемы), отправляет информацию о текущем этапе вычисления.

Полученные от вычислительного модуля результаты передаются ядру системы, чтобы в дальнейшем другой модуль коммуникации мог передать их в качестве входных данных на следующий вычислительный модуль (элемент радиосистемы). Модель радиосистемы состоит из множества элементов, реализованных в виде программных и/или аппаратных модулей, имеющих сетевую архитектуру. Модули связаны между собой в зависимости от моделируемой радиоси-

стемы. Коммуникационные модули определяют место подчиненного им вычислительного модуля на основе его типа. Например, модуль типа «e3_std Блок моделирования системы связи (передатчик+канал+приемник (Qt C++)) (e3_bmss.exe)» использует результат вычисления модулей «e1_las Блок генерации исходных данных серии экспериментов (C++) (e1_bgidse.exe)».

Интерфейс коммуникационного модуля, обрабатывающего задачу, показан на рисунке 8.

Модуль может работать в автономном режиме, его можно свернуть в трей операционной системы. Если настройки сохранить, то при очередном запуске модуля он откроется с учетом указанных настроек.

Контроль и управление ходом обработки серий экспериментов осуществляется через web-интерфейс (рисунок 6).

Клиентское Web-приложение позволяет просматривать и анализировать все этапы прохождения серии экспериментов с помощью графических иллюстраций промежуточных и итоговых результатов серии экспериментов в распределенной сети.

Например, проиллюстрируем информативность графического интерфейса для серии экспериментов, когда в качестве базовой СКК используется математическая модель ОМЧС-КАМ-ДПФ, а в качестве исследуемой СКК используется математическая модель ОМЧС-КАМ-ДКП4-ДСП4. Число поднесущих $N = 16$, число используемых временных отсчетов $M = 16$, число экспериментов в серии $P = 100$, отношение сигнал-шум $RSN = 12$ дБ. На графиках представлены квадратурная и синфазная составляющие QAM сигнала.

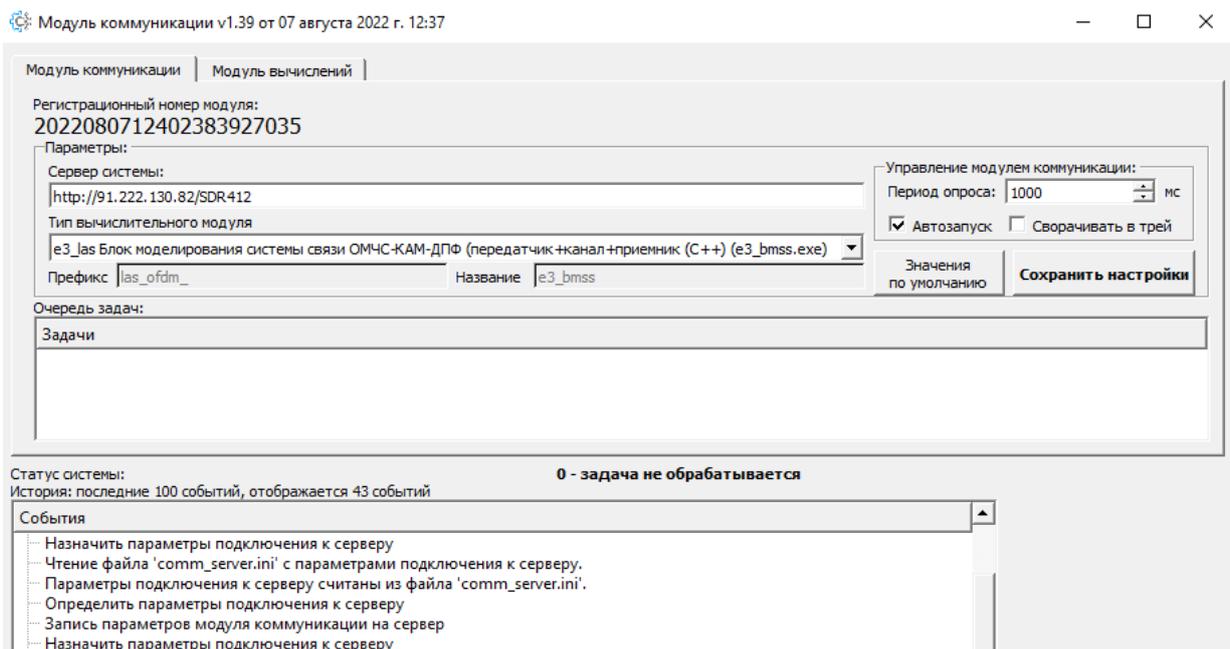


Рисунок 8. Модуль коммуникации распределенной вычислительной системы

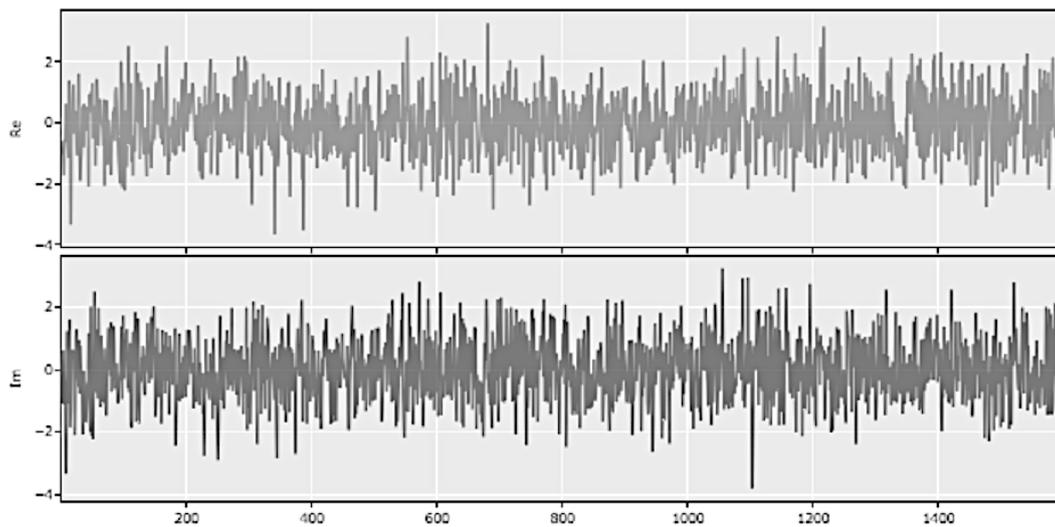


Рисунок 9. Аддитивный гауссовский белый шум, накладываемый на сигнал

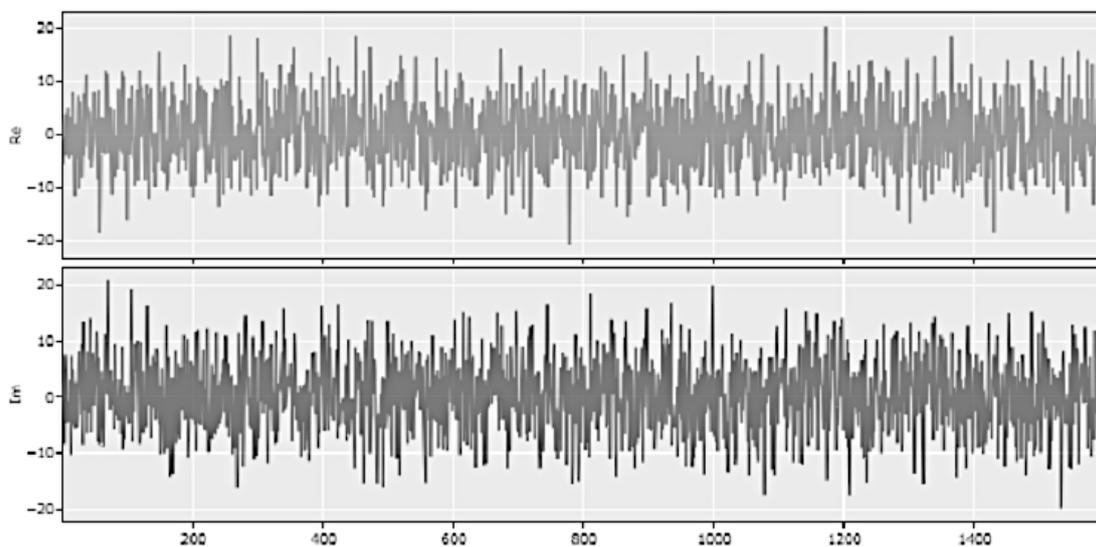


Рисунок 10. Восстановленный сигнал

Таблица 1. Результаты серии экспериментов

Энергетические и информационные характеристики	Исследуемая СКК	Базовая СКК
Средняя мощность сигнала в серии экспериментов	81.800	163.600
Средняя мощность шума в серии экспериментов	5.161	10.322
Полоса частот, занимаемая сигналом	14.295	13.990
Энергетическая эффективность	0.465	0.241
Длительность передачи символа	0.5	1.0
Количество переданных символов	3200	3200
Количество ошибочно принятых символов	179.000	182.000
Скорость передачи информации, бит/сек	105.359	53.522
Пропускная способность модели канала связи	58.246	57.003
Информационная эффективность	1.809	0.939

На выходе передатчика формируется случайная целочисленная последовательность с нормальным распределением. На информационный сигнал накладывается аддитивный гауссовский белый шум (рисунок 9). После обратного ДСП4 преобразования, восстановленный сигнал на сто-

роне приемника представлен на рисунке 10.

Аналогичные графики иллюстрируют результаты для базовой СКК. В итоге получаем сравнительные характеристики для исследуемой и базовой СКК (таблица 1).

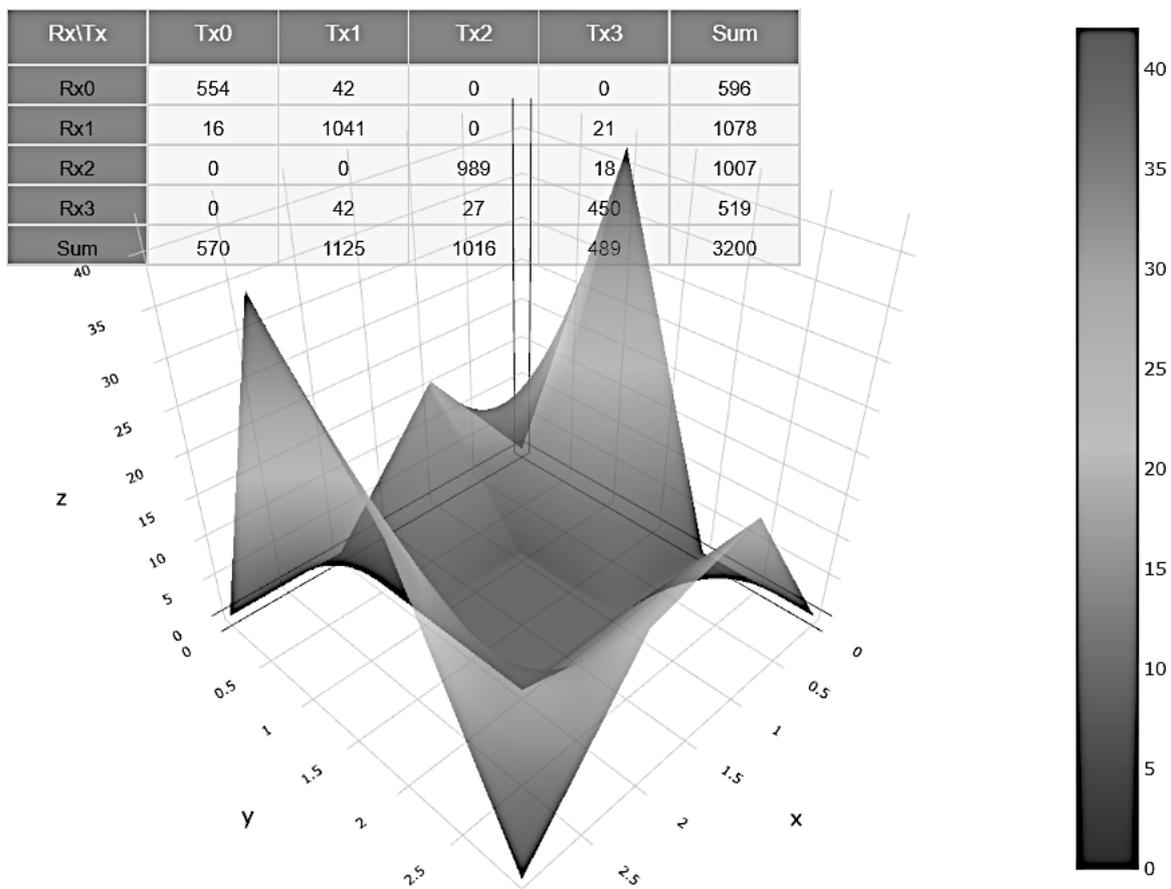


Рисунок 11. Частота приема i -ого QAM-символа при передаче j -ого символа

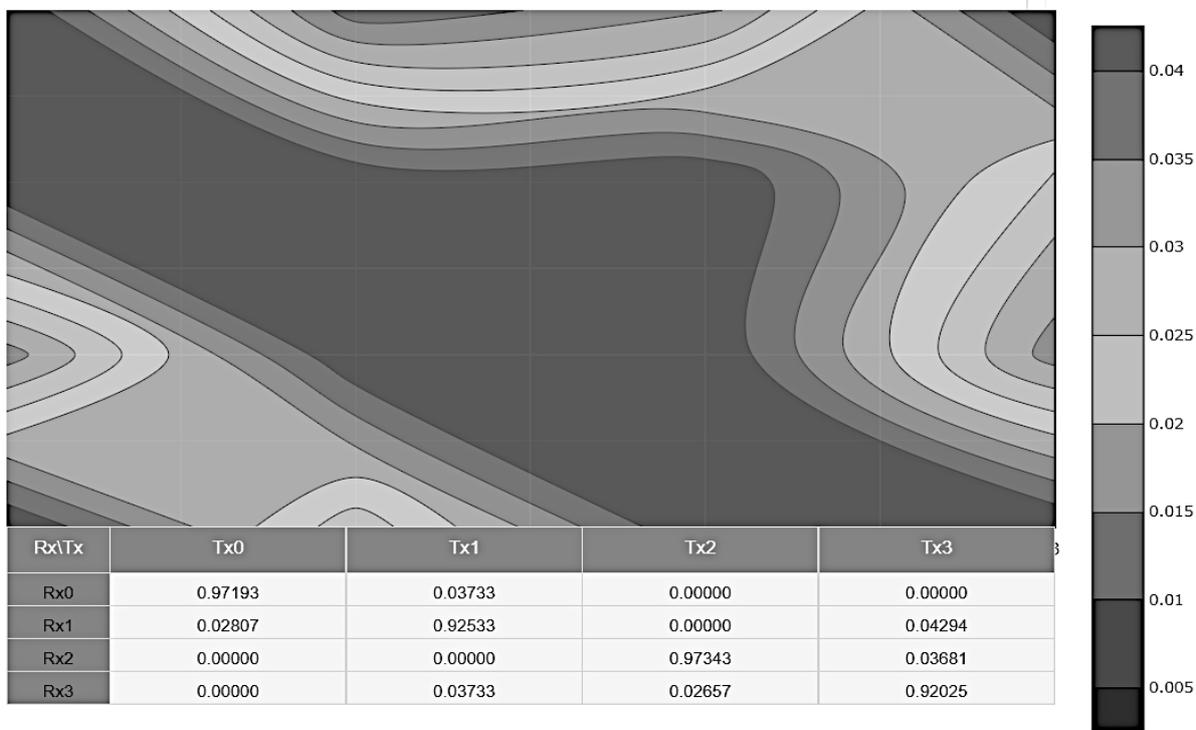


Рисунок 12. Вероятность приема i -ого QAM-символа при передаче j -ого символа

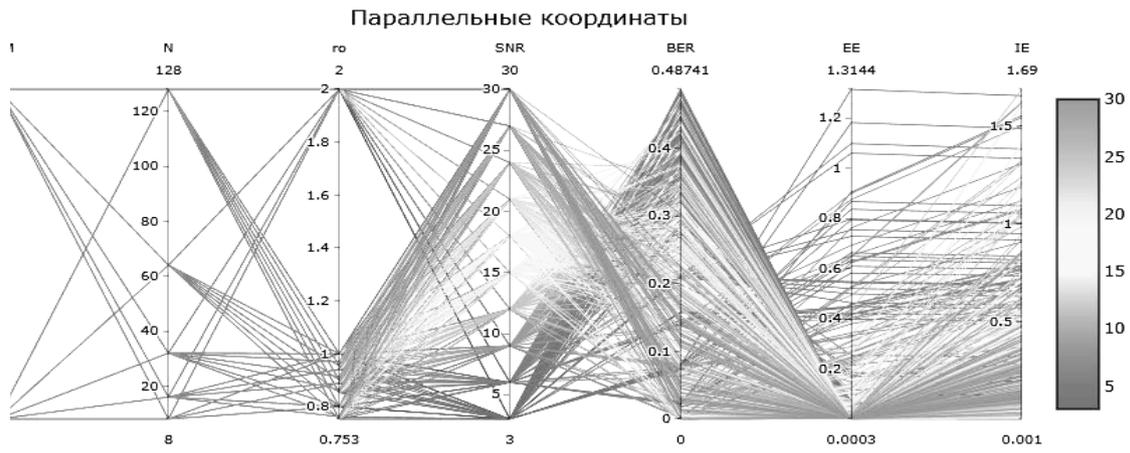


Рисунок 13. Результаты проведения серии экспериментов в параллельных координатах

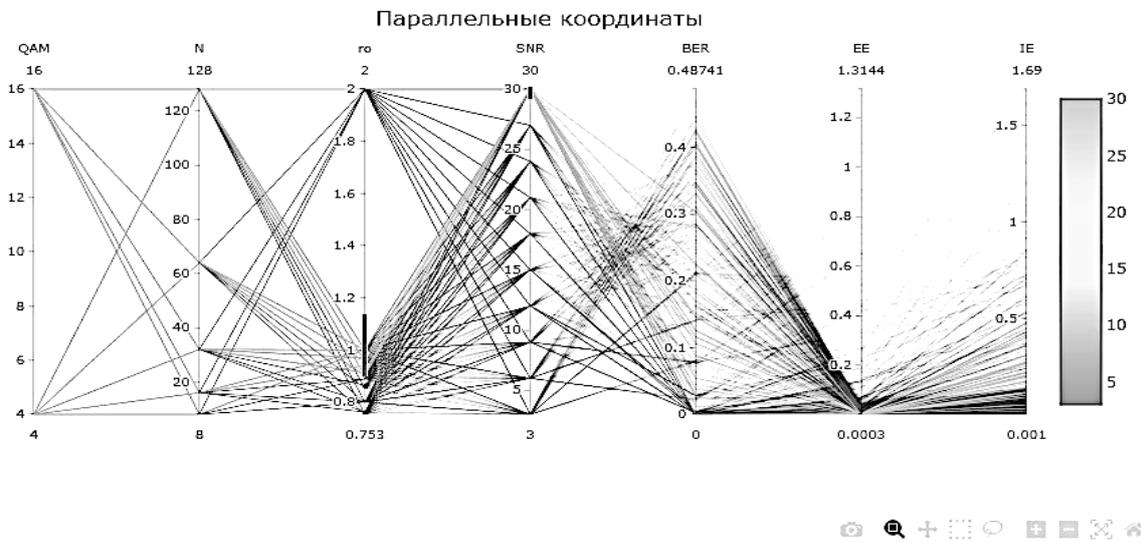


Рисунок 14. Результаты экспериментов при заданных ограничениях

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Результаты анализа информационных и энергетических характеристик исследуемых систем связи

- QAM – позиционность КАМ;
- N – число поднесущих СКК;
- СКК – тип сигнально-кодовой конструкции (ОМЧС-КАМ-ДПФ, ОМЧС-ДСП4-ДКП4, ОМЧС-КАМ-ДПФ, МЧС-КАМ-ДПФ);
- выигрыш во времени приема/передачи сигнала относительно ОМЧС-КАМ-ДПФ;
- SNR – отношение сигнал/шум, дБ;
- BER – вероятность битовой ошибки;
- информационная эффективность;
- энергетическая эффективность;

QAM	N	СКК	Выигрыш во времени	SNR	BER	Информационная эффективность	Энергетическая эффективность
4	8	ОМЧС-КАМ-ДПФ	1.00	3.00	0.0808	0.799	0.634
4	8	ОМЧС-ДСП4-ДКП4	2.00	3.00	0.0802	1.001	0.794
4	8	МЧС-КАМ-ДПФ	0.88	3.00	0.1471	0.566	0.449

Рисунок 15. Фрагмент отчета с результатами анализа проведенной серии экспериментов

Полученные результаты также иллюстрируются интерактивными графиками. Например, на рисунках 11 и 12 приведены анимационные графики, полученные в результате обработки данных рассмотренного выше эксперимента для частоты приема i -ого QAM-символа при передаче j -ого символа и для вероятности приема i -ого QAM-символа при передаче j -ого символа.

В системе предусмотрена возможность исследовать результаты анализа в параллельных координатах (рисунок 13).

Более того, в процессе анализа можно в интерактивном режиме задавать пороговые значения интересующих параметров и видеть какие результаты моделирования достигались в ходе работы системы. На рисунке 14 показаны результаты экспериментов при заданных ограничениях в коридорах для интервала распознавания сигнала и SNR. Цветом выделены допустимые при этих ограничениях исходы.

Отчеты формируются автоматически для всех возможных сочетаний параметров серий экспериментов. Все отчеты о результатах сохраняются в форматах *.doc и *.pdf и, следовательно, могут быть распечатаны (рисунок 15).

Заключение

Современные информационные технологии превратили метод математического моделирования в мощный инструмент, позволяющий моделировать сложные прикладные задачи в области создания перспективных систем радиосвязи. Реализованная распределенная вычислительная система, позволяет агрегировать информацию, сгенерированную в процессе проведения экспериментов над прототипами элементов радиоканала и системой передачи информации в целом, а также наглядно отображать полученные результаты. Это позволяет значительно сократить время анализа результатов и определить вектора развития. Выбранный стек технологий позволил создать распределенную систему для выполнения серий экспериментов на основе запрограммированных математических моделей, которые составляют ядро системы. При этом обеспечивается защищенность информационных потоков, удобство работы с системой, расширяемость системы и возможность исследовать прототипы системы и программные модели с сохранением интеллектуальной собственности автора вычис-

лительного модуля. Вычислительные модули могут запускаться на рабочей станции исследователя, в этом случае ядро системы распределяет вычислительные ресурсы.

Литература

1. Хэнчеп Э., Листуон Б. Vue.js в действии. СПб.: Питер, 2019. 304 с.
2. Документация по Celery. URL: <https://docs.celeryq.dev/en/stable/> (дата обращения: 15.09.2023).
3. Ипатов В.П. Широкополосные системы и кодовое разделение сигналов. М.: Техносфера, 2007. 488 с.
4. Леонович Г.И., Сорокин М.С., Крутов А.Ф. Низкочастотный радиотелеметрический канал на основе пространственно-распределенной приемной антенной системы и ортогонального частотного мультиплексирования // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2011. Т. 13, № 6. С. 48–51.
5. Цветов В.П., Графкин А.В., Луканов А.С. Программный стенд для моделирования цифровых каналов систем радиосвязи // Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций: материалы Всероссийской научно-технической конференции. Самара: ООО «Артель», 2023. С. 179–172.
6. Об одной модели динамического управления потоком данных в радиоканале / В.П. Цветов [и др.] // Перспективные информационные технологии: материалы Международной научно-технической конференции. Самара, 2015. С. 299–302.
7. Цветов В.П. Об одной задаче декодирования символов по неполным данным в радиоканале // Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ-2017): материалы III Международной конференции. Самара, 2017. С. 954–957.
8. Цветов В.П. Использование помех для защиты данных в радиоканале // Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ-2020): материалы VI международной конференции. Самара, 2020. С. 255–260.
9. Tsvetov V.P. Wireless channel noises and data protection. CEUR Workshop Proceedings. 2020. Vol. 2667. P. 234–237.
10. Технология OFDM: учебное пособие для вузов / М.Г. Бакулин [и др.]. М.: Горячая линия - Телеком, 2015. 360 с.

Получено 12.10.2023

Графкин Алексей Викторович, к.т.н., доцент кафедры безопасности информационных систем (БИС) Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева (Самарский университет). 443086, Российская Федерация, г. Самара, Московское шоссе, 34. Тел. +7 927 607-00-44. E-mail: lvg_alex@mail.ru

Цветов Виктор Петрович, к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедры БИС Самарского университета. 443086, Российская Федерация, г. Самара, Московское шоссе, 34. Тел. +7 927 001-89-56. E-mail: tsf-su@mail.ru

Луканов Александр Сергеевич, к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедры информатики и вычислительной математики Самарского университета. 443086, Российская Федерация, г. Самара, Московское шоссе, 34. Тел. +7 927 659-34-12. E-mail: las15@mail.ru

IMPLEMENTATION OF DISTRIBUTED COMPUTING SYSTEM FOR SIMULATING OF THE RADIO COMMUNICATION PROCESSES

Grafin A.V., Tsvetov V.P., Lukanov A.S.
Samara National Research University. Samara, Russian Federation
E-mail: las15@mail.ru

Today, the most important component of the mathematical modeling method, which is effectively used to solve modern application problems, is modern information technology, which allows not only to accumulate practically unlimited amounts of experimental information, but also to analyze this data using visualization methods. The article discusses issues related to the development and implementation of a distributed computing system that makes it possible to simulate and analyze multiple experiments for data transmission in the case of using multi-frequency communication systems. Signal models with maximum entropy are used as message source models. As a model of a communication channel with noise, a channel with additive Gaussian noise which has a uniform spectrum in a given frequency band is used. The implemented computing system allows tabular and visual analysis of such parameters of the multiple experiments as the number of signal subcarriers, the range of time interval for signal restoration, the signal-to-noise ratio, the quadrature and in-phase components of the QAM signal, the energy and information characteristics of the signal and the speed of data transmission of the communication channel. The results of the serial experiments are illustrated in form of interactive graphs with animated effects.

Keywords: *mathematical modeling method, databases, information system, array of experiments, signal-no-code construction, noise superimposition on the signal, message recovery according to the noisy continuous signal model*

DOI: 10.18469/ikt.2023.21.2.11

Grafin Aleksei Viktorovich, Samara National Research University, 34, Moskovskoe shosse, Samara, 443086, Russian Federation; Associated Professor of Information Systems Security Department, PhD in Technical Science, Associated Professor. Tel. +7 927 607-00-44. E-mail: lvg_alex@mail.ru

Tsvetov Viktor Petrovich, Samara National Research University, 34, Moskovskoe shosse, Samara, 443086, Russian Federation; Associated Professor of Information Systems Security Department, PhD in Physics and Mathematics Science, Associated Professor. Tel. +7 927 001-89-56. E-mail: tsf-su@mail.ru

Lukanov Aleksandr Sergeevich, Samara National Research University, 34, Moskovskoe shosse, Samara, 443086, Russian Federation; Associated Professor of Computer Science and Computational Mathematics Department, PhD in Physics and Mathematics Science, Associated Professor. Tel. +7 927 659-34-12. E-mail: las15@mail.ru

References

1. Hanchett E., Listwon B. *Vue.js in Action*. Saint Petersburg: Piter, 2019, 304 p. (In Russ.)
2. Celery Documentation. URL: <https://docs.celeryq.dev/en/stable/> (accessed: 15.09.2023).
3. Ipatov V.P. *Wideband systems and code division of signals: Monograph*. Moscow: Tehnosfera, 2007, 488 p. (In Russ.)
4. Leonovich G.I., Sorokin M.S., Krutov A.F. Low frequency radio telemetry channel on the basis of spatially distributed receiving antenna system and orthogonal frequency division multi-

- plexing. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk*, 2011, vol. 13, no. 6, pp. 48–51. (In Russ.)
5. Tsvetov V.P., Grafkin A.V., Lukanov A.S. Software stand for modeling digital channels of radio communication systems. *Aktualnye problemy radioelektroniki i telekommunikacij: materialy Vserossijskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii. Samara: OOO Artel*, 2023, pp. 179–182. (In Russ.)
 6. Tsvetov V.P. et al. About one model of dynamic control of data flow in a radio channel. *Perspektivnye informacionnye tekhnologii: materialy Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii. Samara*, 2015, pp. 299–302. (In Russ.)
 7. Tsvetov V.P. On one problem of decoding symbols using incomplete data in a radio channel. *Informacionnye tekhnologii i nanotekhnologii (ITNT-2017): materialy III Mezhdunarodnoj konferencii. Samara*, 2017, pp. 954–957. (In Russ.)
 8. Tsvetov V.P. Using of interference for data protection in the radio channel. *Informacionnye tekhnologii i nanotekhnologii (ITNT-2020): materialy VI Mezhdunarodnoj konferencii. Samara*, 2020, pp. 255–260. (In Russ.)
 9. Tsvetov V.P. Wireless channel noises and data protection. *CEUR Workshop Proceedings*, 2020, vol.2667, pp. 234–237.
 10. Bakulin M.G. *OFDM technology: Textbook for Universities*. Moscow: Goryachaya liniya - Telekom, 2015, 360 p.

Received 12.10.2023

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ И БЕЗОПАСНОСТЬ ОБОРУДОВАНИЯ

УДК 621.372.552

ВЛИЯНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО КРИПТОГРАФИЧЕСКОГО КОДИРОВАНИЯ СООБЩЕНИЯ НА ЕГО ОБНАРУЖИВАЕМОСТЬ В СТЕГАНОГРАФИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Шамшаев М.Ю., Шакурский М.В.

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ
E-mail: maxsham2000@mail.ru, m.shakurskiy@gmail.com

Классическая задача стеганографии заключается в маскировке важного сообщения в покрывающем объекте, не представляющем интерес для злоумышленника. При этом внимание уделяется защите от обнаружения самого факта встраивания сообщения, так как в случае подозрения злоумышленником факта наличия скрытого сообщения в передаваемом информационном объекте злоумышленник может разрушить сообщение. Внимание же устойчивости к прочтению в стеганографии не уделяется, так как считается, что этот вопрос решается посредством предварительного криптографического шифрования сообщения. Однако, такое шифрование влияет на статистические параметры сообщения, что играет немаловажную роль при формировании стеганографической системы. Статья посвящена анализу влияния криптографического кодирования на потенциальную обнаруживаемость сообщения после стеганографической маскировки. Приводятся результаты исследования влияния криптографического кодирования на распределение значений передаваемой информации при использовании шифра «Кузнечик».

Ключевые слова: стеганография, криптография, криптографическое кодирование, распределение значений

Введение

В настоящее время вопрос безопасности передачи информации является одним из самых актуальных в области информационных технологий. Это связано как с переходом многих сфер человеческих и корпоративных взаимоотношений в области электронных систем передачи данных, так и с растущим уровнем киберпреступности.

Очевидно, что системы защиты информации находятся в положении «отстающего», так как преступники постоянно находят новые пути обмана. С другой стороны, внедрение новых систем безопасности скрывается бюрократическим аппаратом в организациях. Тем не менее, постоянное развитие систем защиты информации значительно осложняет работу злоумышленников.

Одним из важных аспектов информационной безопасности является передача данных по открытым каналам связи, включающим в себя проводные и беспроводные сети, интернет и другие средства, где невозможно гарантировать отсутствие утечки передаваемой информации. Для решения задачи конфиденциальности передаваемых данных используется аппарат криптографии [1].

Задачей криптографического кодирования является обеспечение конфиденциальности передаваемой информации, то есть злоумышленник, зная о передаче информации, не имеет возможности ее дешифровки. Однако целостность передаваемой информации не гарантируется, так как в случае необходимости канал или сообщение могут быть разрушены. В случае, если злоумышленник способен разрушить сообщение, подозревая его ценность, криптографическое кодирование малоэффективно. Такая ситуация может возникнуть в случае тайной переписки, передачи сигналов управления беспилотными аппаратами и в других случаях. Тогда эффективным способом защиты является маскировка информации – стеганография. Здесь важно заметить, что стеганография не гарантирует целостность канала и сообщения. Они также могут быть разрушены. Речь идет о той грани, когда принимается решение о разрушении канала и сообщения. То есть, при перехвате информации злоумышленник не преследует цель разрушить канал и сообщение. Его задача - разрушить его только в случае передачи важного сообщения. Именно в этом свете маскировка важного сообщения в неважное способна обеспечить его доставку. Таким образом, ключевую роль играет не вопрос прочтения сообщения, а сам факт подозрения, что в передаваемой информации скрыто важное сообщение. Поэтому, в стеганографии вопрос политики злоумышленника, используемых им методов оценки передаваемой информации и набора возможных действий является открытым и требует дополнительных исследований.

При анализе стеганографических методов принимается определенная рабочая модель поведения злоумышленника. В соответствии с этой моделью производится исследование и анализ метода. При этом используется целый ряд допущений, которые на практике могут быть и некорректными.

Исследование, описанное в данной статье, позволяет уточнить модель стеганографической системы и проиллюстрировать совместное использование стеганографического и криптографического кодирования.

В научной литературе [1; 2] указывается, что при стеганографической маскировке сообщения,

защита от прочтения решается предварительным криптографическим шифрованием. Например, современные блочные шифры обладают достаточной устойчивостью к взлому и высокой скоростью шифрования. Однако, важным вопросом стеганографии является характер шифруемого сообщения. Учитывая объем передаваемых данных, акцент в стеганографическом анализе делается на статистических методах оценки информации, передаваемой по открытому каналу связи. При анализе методов стеганографии мало внимания уделяется статистическому характеру сообщения. Так часть встраиваемого сообщения может состоять из последовательности только нулей или только единиц, что может оказать значительное влияние на статистические характеристики стеганографической системы (заполненного стеганографического контейнера). Предварительное криптографическое шифрование оказывает определенное влияние на статистические характеристики сообщения. При этом многообразии различных вариантов шифрования может оказывать различное влияние на параметры встраиваемого сообщения. Таким образом, предварительное криптографическое шифрование позволяет не только обезопасить встраиваемое сообщение от прочтения, но и уточнить статистическую модель встраиваемого сообщения, что, в свою очередь, позволит уточнить потенциальную полезную нагрузку стеганографической системы.

В статье взят для анализа шифр «Кузнечик». Криптографический шифр «Кузнечик» использует блочное шифрование с длиной блока 128 бит и ключом длиной 256 бит. Шифр работает в режиме ECB (electronic code book) или в режиме простой замены. В процессе шифрования используется матрица 8x8, которая состоит из 64 байтов, и представляет собой расширенный вектор [3].

Процесс шифрования происходит в 10 раундов, в каждом из которых используется 8 нелинейных преобразований и 1 линейное преобразование. Нелинейные преобразования основаны на заменах байтов и перестановках битов, а линейное преобразование основано на умножении матрицы на столбец данных [4].

Данный шифр утвержден в качестве стандарта в ГОСТ Р 34.12-2015 «Информационная технология. Криптографическая защита информации. Блочные шифры» приказом от 19 июня 2015 года № 749-ст. Стандарт вступил в действие с 1 января 2016 года. Шифр разработан Центром защиты информации и специальной связи ФСБ России с участием АО «Информационные технологии и коммуникационные системы» [5–10].

Моделирование криптографического шифрования

Компьютерное моделирование шифрования выполнено на языке Python. В качестве сообщения выбраны три набора с различным распределением значений: с одинаковым количеством нулей и единиц, с доминирующим количеством нулей и с доминирующим количеством единиц. Это позволило оценить влияние шифрования на распределение значений в зашифрованных сообщениях. Сами значения подбирались генератором псевдослучайных чисел.

Для проведения эксперимента была создана программа генерации исходного сообщения в двоичной системе счисления, которая формирует сообщение длиной 1024 символа с указанным распределением нулей и единиц. Также программа переводит полученное число из двоичной системы счисления в шестнадцатеричную. Код программы приведен ниже:

```
import random
# Генерация случайного сообщения
message_length = 1024
zero_percent = 95 # Процент нулей
message = "".join (
    "0" if random.randrange (100) < zero_percent
else "1"
    for _ in range (message_length)
)
print («Сообщение в двоичном виде:», message)
# Перевод двоичного сообщения в шестнадцатеричное
hex_message = hex (int(message, 2))[2:]
print («Сообщение в шестнадцатеричном виде:», hex_message.upper ())
```

Выходные данные программы генерации сообщения:

```
Сообщение в 16-ричном виде: 93A038991EEF
74F256F19F80639B4371EDCF1B7D0176A4865A
2FF7FF209A41F240C023F8D3501178D8D6B7B7
266CFEF78AAF76D1D4461BDAF773A56EAED1
1C84878EC935B53C3151BE33C576C44B215623
C06FFDEC36BCF3CCC0BEC8FB08F4CADBC28
43CC4F85AD12A5B7318EE57A77443E2C0991D
E3471BF156415F651E3CD9.
```

Следующим шагом полученное сообщение в шестнадцатеричном виде шифруется при помощи криптографического шифра «Кузнечик». В результате шифрования получено сообщение, представленное ниже.

```
Зашифрованное сообщение в 16-ричном виде:
D206700720EAD67902EAACA5DE855A8585512
E8D93CEE3067A4D6CDCF799B2E79AF8B3B4F
C82F13A0D6B07A979A8D9A3A8BF70A30BEA
66C31C95B9B6245C469EB89B6E19078AAFC3B-
```

```
8B0D13D87BF4D5F9D30EF62CBF512FFADA0D
17BA473735E4C49783FDS201FCEES8ED91B082
C72S4E261C20B89BBB4D1A49C5746S7D66D85
```

Проведем анализ распределения значений в зашифрованном сообщении. Для этого воспользуемся встроенным аппаратом построения гистограмм. Код программы построения гистограмм приведен ниже:

```
import matplotlib.pyplot as plt
def count_zeroes_ones (message):
    zeroes = message.count ('0')
    ones = message.count ('1')
    return zeroes, ones
def main ():
    message1 = input («Введите исходное сообщение: «)
    message2 = input («Введите зашифрованное сообщение: «)
    zeroes1, ones1 = count_zeroes_ones (message1)
    zeroes2, ones2 = count_zeroes_ones (message2)
    labels = ['Нули', 'Единицы']
    message1_data = [zeroes1, ones1]
    message2_data = [zeroes2, ones2]
    x = range (len(labels))
    fig, ax = plt.subplots ()
    ax.bar (x, message1_data, width=0.3, label='Исходное сообщение')
    ax.bar ([x_elem + 0.3 for x_elem in x], message2_data, width=0.3, label='Зашифрованное сообщение')
    ax.set_ylabel ('Количество')
    ax.set_xlabel ('Данные')
    ax.set_title ('Распределение нулей и единиц')
    ax.set_xticks ([x_elem + 0.15 for x_elem in x])
    ax.set_xticklabels (labels)
    ax.legend ()
    ax.grid (True)
    ax.set_ylim ([0, max(max(message1_data), max(message2_data))+1])
    plt.show ()
if __name__ == '__main__':
    main ()
```

Из проведенных экспериментов для анализа выбраны три с различным соотношением количества нулей и единиц в шифруемом сообщении.

Эксперимент №1: 50% нулей и 50% единиц. Результат моделирования приведен в виде диаграммы на рисунке 1.

Эксперимент №2: 5% нулей и 95% единиц. Результат моделирования приведен в виде диаграммы на рисунке 2.

Эксперимент №3: 95% нулей и 5% единиц. Результат моделирования приведен в виде диаграммы на рисунке 3.

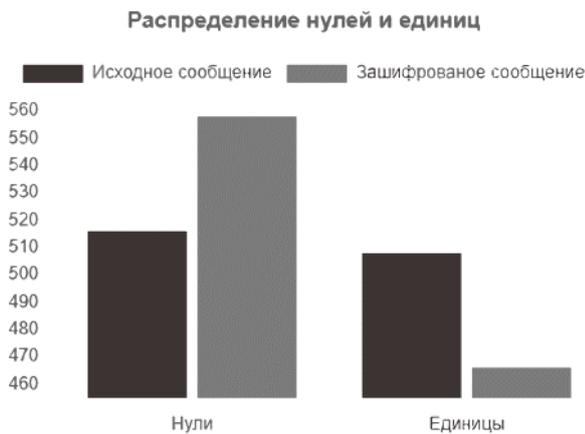


Рисунок 1. Результат моделирования при 50% логических нулей и 50% логических единиц

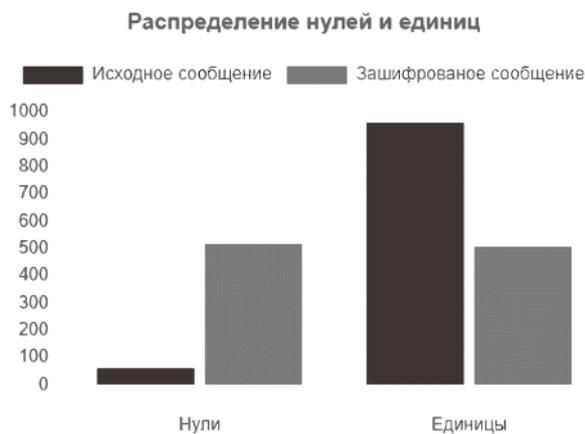


Рисунок 2. Результат моделирования при 5% логических нулей и 95% логических единиц

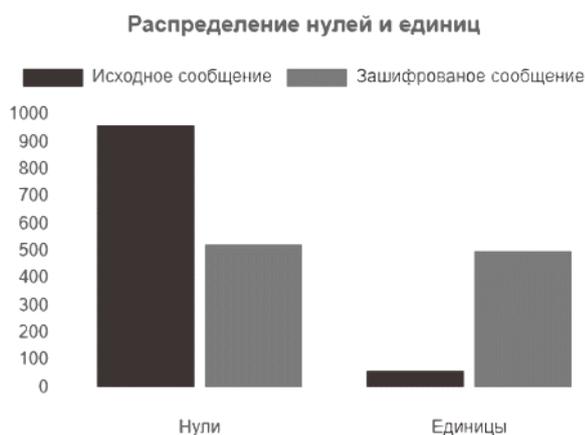


Рисунок 3. Результат моделирования при 95% логических нулей и 5% логических единиц

Видно, что в результате шифрования распределение значений становится близким к равномерному. Данный результат говорит в пользу использования блочных шифров на основе сети Фейстеля, так как позволяет построить модель стеганографической системы, в которой сообще-

ние всегда имеет распределение близкое к равномерному.

Анализ эксперимента и заключение

Полученный в работе результат имеет важное значение, так как позволяет определить статистические характеристики сообщения. Например, если допустить, что сообщение предварительно криптографически зашифровано, то при проектировании и исследовании стеганографических систем можно считать, что распределение значений сообщения близко к равномерному.

Важно отметить, что не все шифры оказывают аналогичное воздействие на распределение значений в сообщении, что требует развития исследований. Полученное равномерное распределение значений сообщения не является однозначным достоинством. С одной стороны, совместно с использованием маскировки в наименьшем битном слое покрывающего объекта, можно считать такое распределение достоинством, с другой стороны только по отношению к покрывающим объектам, где наименьший битный слой обладает равномерным распределением. Это встречается не так уж часто. Более того, в работах [6–9] показано, что равномерное распределение в наименьшем битном слое может рассматриваться как индикатор наличия скрытого сообщения, которое может быть легко обнаружено на основе NIST-тестов.

Таким образом, использование блочных шифров позволяет сделать распределение встраиваемых сообщений близким к равномерному, что позволит более точно определить предел полезной нагрузки при формировании стegosистемы на основе известных методов и обеспечить конфиденциальность скрытой информации. Однако в системах реального времени использование блочных шифров для предварительного шифрования может привести к потенциальной уязвимости стegosистемы, так как статистический характер покрывающего объекта случаен и не может быть предварительно проанализирован [10].

Литература

1. Таранников Ю. Зачем в криптографии используется кодирование? URL: <https://postnauka.ru/faq/85941> (дата обращения: 06.05.2023).
2. Агурьянов И. Виды и способы криптографических преобразований. URL: <https://www.securitylab.ru/blog/personal/aguryanov/29980.php> (дата обращения: 06.05.2023).
3. Криптографический алгоритм «Кузнечик»: просто о сложном. URL: <https://habr.com/ru/articles/459004/> (дата обращения: 06.05.2023).

4. Дроботун Е. Работаем с алгоритмом блочного шифрования «Кузнечик» из ГОСТ 34.12-2015. URL: <https://hacker.ru/2017/02/02/working-with-grasshopper/> (дата обращения: 06.05.2023).
5. Шишкин В. ГОСТ Р 34.12–2015: чего ожидать от нового стандарта? URL: <https://lib.itsec.ru/articles2/crypto/gost-r-chego-ozhidat-ot-novogo-standarta> (дата обращения: 06.05.2023).
6. Гистограммы и графики распределения в Python. URL: <https://itnan.ru/post.php?s=1&p=683738> (дата обращения: 06.05.2023).
7. Грибунин В.Г., Оков И.Н., Туринцев И.В. Цифровая стеганография. 2-е изд. М.: СОЛОН-Пресс, 2021. 262 с.
8. Обзор методов статистического анализа данных. URL: <http://statlab.kubsu.ru/node/4> (дата обращения: 06.05.2023).
9. Шифр «Кузнечик» (ГОСТ Р 34.12-2015) и режимы работы блочных шифров (ГОСТ Р 34.13-2015). URL: https://studme.org/239569/informatika/shifr_kuznechik_gost_3412_2015_rezhimy_raboty_blochnyh_shifrov_gost_3413_2015 (дата обращения: 06.05.2023).
10. Караулова О.А., Шакурский М.В. Особенности оценки стеганографических систем с точки зрения стеганографического анализа // Ассоциация выпускников и сотрудников ВВИА имени профессора Н.Е. Жуковского: материалы XIX Международной научно-практической конференции, 2022. С. 66–70.

Получено 05.09.2023

Шамшаев Максим Юрьевич, магистрант кафедры информационной безопасности (ИБ) Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ). 443010, Российская Федерация, г. Самара, ул. Л.Толстого, 23. Тел. +7 960 817-26-89. E-mail: maxsham2000@mail.ru

Шакурский Максим Викторович, д.т.н., заведующий кафедрой ИБ ПГУТИ. 443010, Российская Федерация, г. Самара, ул. Л.Толстого, 23. Тел. +7 (927) 772-98-73. E-mail: m.shakurskiy@gmail.com

THE IMPACT OF PRE-CRYPTOGRAPHIC CODING MESSAGES ON ITS DETECTABILITY IN STEGANOGRAPHIC SYSTEMS

Shamshaev M. Yu., Shakurskiy M. V.

*Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russian Federation
E-mail: maxsham2000@mail.ru, m.shakurskiy@gmail.com*

The usual problem of steganography is to mask an important message in a covering object that is of no interest to the attacker. In this case, attention is paid to protection from detection of the very fact of the message embedding a, since if an attacker suspects the presence of a hidden message in the transmitted information object, he can destroy the message. By the way no attention is paid to reading tolerance in steganography, since it is believed that this issue is solved by preliminary cryptographic encryption of the message. However, such encryption affects statistical parameters of the message, which plays an important role in the steganographic system formation. The article is devoted to the analysis of the influence of cryptographic coding on the potential detectability of the message after steganographic masking. The results of the study on the influence of cryptographic coding on the transmitted data distribution values when using the «Kuznyechik» cipher are presented.

Keywords: *cryptography, cipher, cryptographic coding, python, value distribution*

DOI: 10.18469/ikt.2023.21.2.12

Shamshaev Maxim Yurievich, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 23, L. Tolstoy Street, Samara, 443010, Russian Federation; Master's Degree Student of Information Security Department. Tel. +7 960 817-26-89. Email: maxsham2000@mail.ru

Shakurskiy Maxim Viktorovich, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 23, L. Tolstoy Street, Samara, 443010, Russian Federation; Head of Information Security Department, Doctor of Technical Sciences. Tel. +7 927 772-98-73. Email: m.shakurskiy@gmail.com

References

1. Tarannikov Yu. Why is coding used in cryptography? URL: <https://postnauka.ru/faq/85941> (accessed: 05.06.2023). (In Russ.)

2. Aguryanov I. Types and methods of cryptographic transformations. URL: <https://www.securitylab.ru/blog/personal/aguryanov/29980.php> (accessed: 05.06.2023). (In Russ.)
3. Cryptographic algorithm «Grasshopper»: just about the complex. URL: <https://habr.com/ru/articles/459004/> (accessed: 05.06.2023). (in Russ.)
4. Drobotun E. We work with the block cipher algorithm «Grasshopper» from GOST 34.12-2015. URL: <https://xakep.ru/2017/02/02/working-with-grasshopper/> (accessed: 05.06.2023). (In Russ.)
5. Shishkin V. GOST R 34.12–2015: what to expect from the new standard? URL: <https://lib.itsec.ru/articles2/crypto/gost-r-chego-ozhidat-ot-novogo-standardta> (accessed: 05.06.2023). (In Russ.)
6. Histograms and distribution plots in Python. URL: <https://itnan.ru/post.php?c=1&p=683738> (accessed: 05.06.2023). (In Russ.)
7. Gribunin, V. G., Okov, I. N., Turintsev, I. V. *Digital steganography*. 2nd Ed. Moscow: SO-LON-Press, 2021, 262 p. (In Russ.)
8. Overview of statistical data analysis methods. URL: <http://statlab.kubsu.ru/node/4> (accessed: 05.06.2023). (In Russ.)
9. Cipher «Grasshopper» (GOST R 34.12-2015) and operating modes of block ciphers (GOST R 34.13-2015). URL: https://studme.org/239569/informatika/shifr_kuznechik_gost_3412_2015_rezhimy_raboty_blochnyh_shifrov_gost_3413_2015 (date of access: 05/06/2023). (In Russ.)
10. Karaulova O. A., Shakurskiy M. V. Peculiarities of evaluating steganographic systems from the point of view of steganographic analysis. *Association of graduates and employees of VVIA named after Professor N.E. Zhukovsky: materialy XIX International Scientific and Practical conferences, 2022*, pp. 66–70. (In Russ.)

Received 05.09.2023

УПРАВЛЕНИЕ И ПОДГОТОВКА КАДРОВ ДЛЯ ОТРАСЛИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

УДК 004.04

СКВОЗНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЕ ВУЗА

Малина А.Б.^{1,2}, Тарутин Н.А.¹

¹Самарский государственный технический университет, Самара, РФ

²Самарский государственный социально-педагогический университет, Самара, РФ

E-mail: kuzdavletova_ab@mail.ru, nikitarutin@mail.ru

В данной статье авторы рассматривают инновационные подходы к внедрению сквозных технологий в сферу образования. Сквозные технологии – это принципиально новые технологические решения, которые проникают во всех стадиях образовательного процесса, объединяя учебные программы, методы обучения и оценку результатов воедино. Целью данной статьи является изучение сквозных технологий с целью повышения эффективности образования, улучшения доступности образовательных ресурсов, а также развития критического мышления и творческих навыков учащихся. В статье проведен анализ существующих сквозных технологий, и выявлены наиболее перспективные подходы для внедрения в образовательный процесс. Разработаны практические инструменты и методики, основанные на использовании сквозных технологий, которые могут быть применены в учебных заведениях различного уровня. В рамках исследования авторы также уделяют внимание аспекту подготовки педагогического состава к использованию сквозных технологий. Отмечается, что интеграция данных технологий помимо технической требует и педагогической подготовки.

Ключевые слова: сквозные технологии, цифровизация образования, искусственный интеллект, обучение, качество образования

Введение

Новые технологические достижения играют важную роль в непрерывном развитии современ-

ного образовательного пространства. Благодаря появлению информационных и коммуникационных технологий стало возможным переосмысле-

ние традиционных методов обучения и внедрение инновационных подходов в высшую школу. Внедрение сквозных технологий – это внедрение инновационных методов и инструментов во все аспекты образовательного процесса вуза. Это одна из перспективных областей исследования [1].

Процедура получения высшего образования всегда отличалась лекциями, практическими и лабораторными занятиями, аудиторными обсуждениями и семинарами, но с внедрением сквозных технологий может произойти сильный сдвиг в парадигме обучения. Это может обеспечить студентам новые возможности для активного и интерактивного обучения. Сквозные технологии создают среду, которая позволяет сделать обучение более индивидуализированным, путем внедрения информационных и коммуникационных инструментов. Так же это будет развивать критическое мышление и коллективную работу у обучающихся.

Для интеграции сквозных технологий в систему высшего учебного заведения (ВУЗ), необходимо преодолеть некоторые трудности, такие как ограниченный доступ к информационным ресурсам, недостаточная квалификация преподавателей, отсутствие необходимого программного обеспечения (ПО) и оборудования, и т.д. Тем не менее, если найти решение данных проблем, то это приведет к новым возможностям и перспективам для улучшения качества образовательной системы, что поспособствует улучшению уровня подготовки студентов и хорошо повлияет на их конкурентоспособность на рынке труда в дальнейшем.

Помимо этого, данные технологии открывают новые возможности для студентов, преподавателей и исследователей, содействуя развитию инноваций в образовательной сфере, ведь каждый год численность учащихся онлайн по программам профессионального образования в России только растет [12].

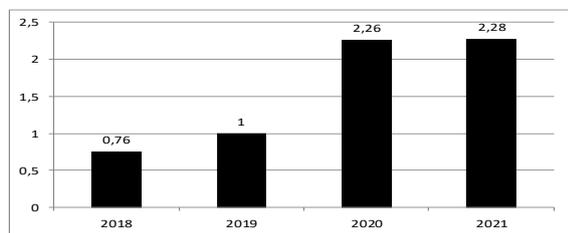


Рисунок 1. Численность учащихся онлайн по программам профессионального образования в России, млн. чел.

Обзор развития сквозных технологий

Появление и развитие сквозных технологий непосредственно связано с историей информаци-

онно-коммуникационных технологий (ИКТ). Появление персональных компьютеров было одной из наиболее важных технологических инноваций. Персональные компьютеры стали общедоступными в начале 1980-х годов, что позволило им войти в образовательную среду. Появление сети Интернет стало еще одной важной технологической новинкой, которая сыграла большую роль в сквозных технологиях. Его использование в образовании стало нормой, которая позволила преподавателям и обучающимся проводить занятия в дистанционном формате, независимо от местонахождения каждого. В наше время, благодаря бурному развитию ИКТ, сквозные технологии претерпели большое развитие: у каждого человека имеется мобильное устройство, появились облачные технологии, технологии виртуальной и дополнительной реальности (AR/VR).

Так как исследование направлено на внедрение методов машинного обучения и искусственного интеллекта для автоматизации процессов оценки знаний студентов и разработки индивидуализированных учебных планов, то оно будет связано с направлением искусственного интеллекта (ИИ).

Методы машинного обучения (МО) и искусственного интеллекта позволяют анализировать данные о каждом обучающемся индивидуально, включая все его особенности: от выполнения домашнего задания, до написания контрольных тестов и коллоквиумов. На основании этих данных алгоритмы МО и ИИ могут определять паттерны, связи и тенденции в учебном процессе и оценивать уровень знаний обучающегося.

На основании этих данных, система может составлять индивидуальные программы для каждого обучающегося. Это означает, что каждому студенту будут предоставлены те материалы и задания, которые соответствуют его потребностям и уровню знаний.

Так же разработанные алгоритмы рекомендаций используются системой для предоставления обучающимся дополнительных ресурсов, помогающих им в обучении. На основании собранных системой данных о каждом обучающемся преподаватель будет учитывать особенности каждого студента и улучшать учебные программы с течением времени.

Таким образом, основной целью данного исследования является использование принципов ИИ и МО для создания эффективной и индивидуализированной системы оценки знаний студентов, а так же для разработки персонализированных учебных планов.

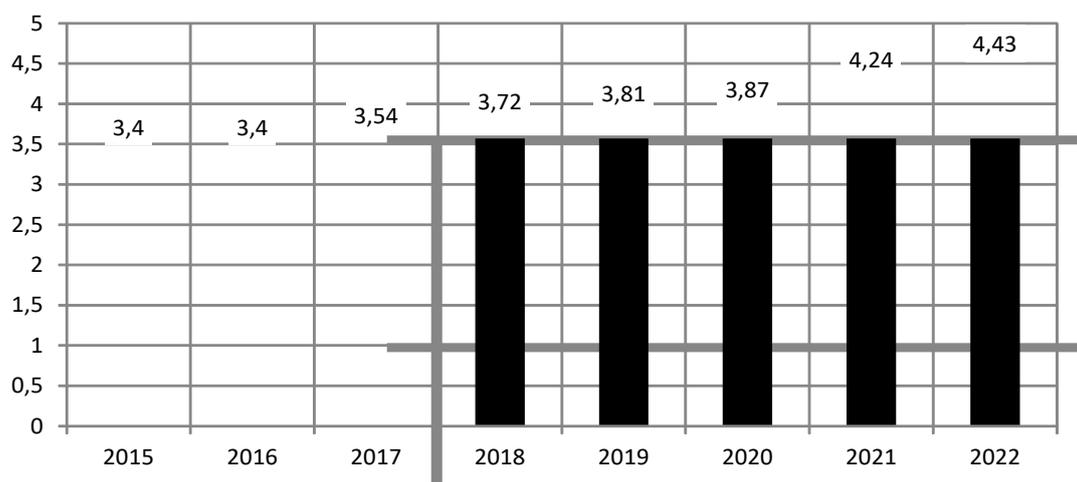


Рисунок 2. Мировые расходы на IT-отрасль, трлн. долл. [13]

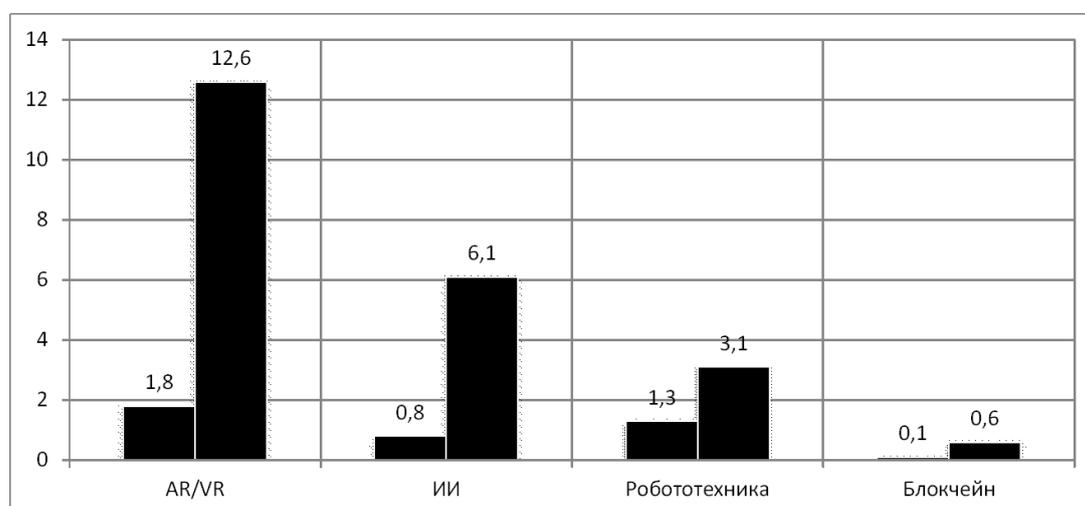


Рисунок 3. Мировые инвестиции на передовые технологии в образовании 2018/2025 г. в млрд. долл. [11]

Внедрение сквозных технологий в образовательную систему высшего учебного заведения имеет огромное значение с практической точки зрения.

Актуальность в условиях быстрого технологического развития. Благодаря технологическому прогрессу, современный мир очень быстро меняется. Сквозные технологии позволяют сделать процесс обучения более приближенным к современной профессиональной среде, где используются ИКТ и навыки работы с данными.

Улучшение качества образования. Внедрение сквозных технологий может значительно повысить качество образования, так как студенты будут приобретать новые навыки и улучшать свои коммуникационные и технологические способности с помощью интерактивных платформ, онлайн-курсов, виртуальных классов и пр. Так же, как было сказано ранее, сквозные технологии учитывают индивидуальные качества и потребности каждого обучающегося.

Развитие новых форм и методов обучения. Внедрение сквозных технологий открывает широкий спектр новых форм и методов обучения. Активное использование мультимедийных материалов, проведение вебинаров и онлайн-конференций, создание виртуальных лабораторий и проектных сред – все это примеры новых методов обучения. Такие методы способствуют более глубокому и интерактивному участию учащихся в учебе, что приводит к повышению их мотивации и улучшению их результатов обучения.

Удовлетворение требований студентов. Современные студенты активно пользуются современными технологиями во всех областях своей жизни. Внедрение передовых сквозных технологий в образовательную систему удовлетворит их потребности в использовании современных технологий и создаст более привлекательную и интерактивную учебную среду, соответствующую их предпочтениям и ожиданиям.

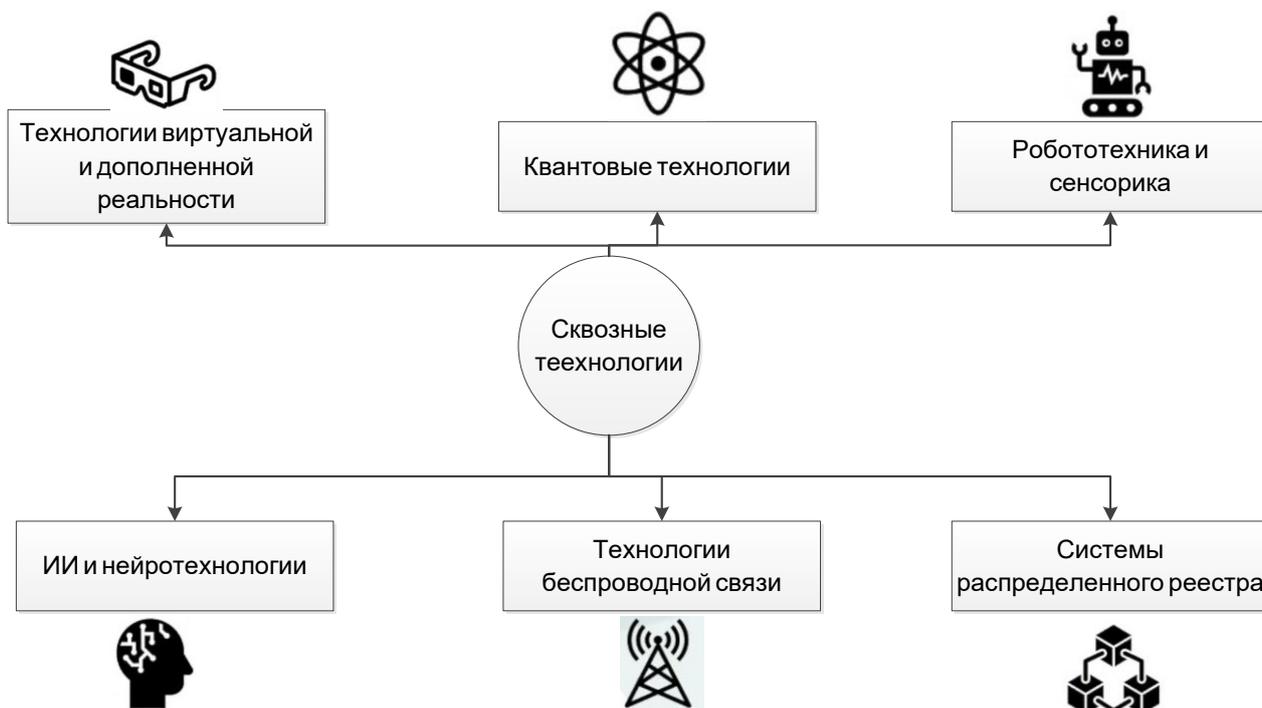


Рисунок 4 Состав сквозных технологий

Конкурентоспособность ВУЗа. Внедрение сквозных технологий значительно повысит статус, а соответственно и конкурентоспособность ВУЗа на рынке образовательных услуг. Чем современнее университет, тем привлекательнее он будет для студентов.

Обобщая, внедрение сквозных технологий положительно повлияет на всю систему образовательного учреждения, начиная от удовлетворенности студентов качеством обучения и заканчивая новыми разработками и исследованиями в данной области

Направление научных исследований и схема внедрения сквозных технологий

Данная тематика может включать в себя такие научные исследования как:

1. Анализ уже существующих сквозных технологий. Исследование возможностей различных современных технологий, таких как ИИ, блокчейн, дополненная и виртуальная реальность их преимущества, недостатки, а также то, что они могут предложить образовательной системе.

2. Оценка потребностей ВУЗа. Оценка требований и выявление проблем, существующих в образовательном процессе. Анализ доступности ИКТ и информационных ресурсов в образовательных учреждениях, опрос студентов и преподавателей для выявления и определения ожиданий от внедрения сквозных технологий.

3. Разработка стратегии внедрения. Разработка такой стратегии, которая включает в себя потен-

циальный план внедрения сквозных технологий в систему конкретного ВУЗа. Определение в данной стратегии основных этапов, механизмов внедрения, а также финансовых и человеческих ресурсов.

4. Конструктивная адаптация сквозных технологий. Исследование способов адаптации сквозных технологий для удовлетворения потребностей и ожиданий студентов, преподавателей и администрации образовательного учреждения.

5. Оценка эффективности и дальнейшее развитие. Оценка результатов внедрения сквозных технологий, основанная на успеваемости студентов, эффективности преподавания и работе университета в целом. Разработка предложений для улучшения использования сквозных технологий в системе образования.

Результаты исследования позволят использовать современные информационные технологии для более эффективного обучения студентов и повышения качества образования.

Обучающиеся смогут получать доступ к актуальной информации, лекциям, практикумам, семинарам и заданиям в режиме онлайн, благодаря интеграции таких технологий. Внедрение облачных сервисов, учебных платформ значительно облегчит самостоятельную работу, позволит получать более глубокую обратную связь от преподавателей в режиме реального времени.

Сквозные технологии дадут возможность студентам более рационально распределять свой учебный процесс.

Помимо этого, правильное использование сквозных технологий позволит преподавателям проводить занятия эффективнее, делать их более адаптированными под современные реалии и удовлетворять потребности каждого обучающегося.

Инструменты коммуникации и командной работы являются основными и используются для эффективного проведения исследования. В качестве основных ресурсов, необходимых для интеграции сквозных технологий в образовательную систему можно выделить следующее:

1. Информационные технологии. Интеграция сквозных технологий требует соответствующей инфраструктуры, ПО, серверных систем, сетевого оборудования, облачных технологий и прочих технологических и информационных технологий.

2. Обучение и переподготовка персонала. Интеграция сквозных технологий потребует переобучения администрации образовательного учреждения, его преподавателей и технического персонала. Для своевременного переобучения требуется проводить соответствующие тренинги, семинары, а также создание дистанционных программ обучения.

3. Исследовательская и разработческая работа. Для эффективного и успешного внедрения сквозных технологий потребуются проведение исследования на целесообразность данной интеграции в конкретном учебном заведении. Это может включать в себя пилотные проекты для оценки эффективности новых технологий, привлечение разработчиков и ученых.

4. Содействие администрации. Администрация образовательного учреждения должна активно поддерживать внедрения новых технологий, так как это повысит статус ВУЗа на федеральном уровне. Разработка стратегии внедрения и поддержки проектов, выделение необходимых финансовых, технических и человеческих ресурсов – все это может являться частью поддержки со стороны администрации.

Заключение

В данной научной статье было рассмотрено потенциальное внедрение сквозных технологий в образовательную систему ВУЗа. Исследование показало, что интеграция данных технологий является важным и эффективным инструментом для повышения качества образования и квалификации студентов.

Такие технологии как МО и ИИ, виртуальная и дополненная реальность способствуют созданию гибкой, удобной и познавательной интерактивной учебной среды, которая стимулирует студен-

тов в процессе обучения. Благодаря разнообразным интерактивным заданиям, моделированию реальных ситуаций и индивидуальному подходу к каждому обучающемуся, образовательные материалы, доступные через сквозные технологии, улучшают учебный опыт.

Помимо этого, интеграция сквозных технологий позволяет студентам улучшить свою цифровую грамотность, которая так важна в современном мире. Так же обучающиеся улучшат свои навыки общения, коммуникаций и критического мышления и будут приходить к более творческому решению проблем. Благодаря современным технологиям ученики могут эффективно общаться друг с другом, расширять свой кругозор и лучше вникать и изучать требуемый материал.

Однако внедрение сквозных технологий требует не только наличия технических и технологических ресурсов, но и компетентных преподавателей, которые умеют правильно использовать цифровые технологии и способные адаптировать учебный процесс под новые возможности. Поэтому интеграция таких технологий требует адекватной подготовки преподавателей и соответствующих образовательных программ.

Следовательно, внедрение сквозных технологий в образовательную систему представляет собой значительный шаг вперед. Тем не менее, необходимо продолжать исследования и разработки в этой области, чтобы оптимизировать процесс внедрения и максимально использовать преимущества сквозных технологий.

Литература

1. Андреев А.А. Дидактические основы дистанционного обучения. URL: <https://studylib.ru/doc/3667317/5.andreev-a.a.-didakticheskie-osnovy-distancionnogo-obucheniya> (дата обращения: 09.10.2023).
2. Захарова И.Г. Информационные технологии в образовании: учебное пособие. М.: Академия, 2005. 192 с.
3. Федосеев А.А. Проектирование учебной деятельности как методическая основа внедрения информационных технологий в образовании // Системы и средства информатики. М.: Наука, 1995. №5. С. 160 – 163.
4. Петухова Е.И. Информационные технологии в образовании // Успехи современного естествознания. 2013. № 10. С. 80–81.
5. Аксюхин А.А., Вицен А.А., Мекшенева Ж.В. Информационные технологии в образовании и науке // Современные наукоемкие технологии. 2009. № 11. С. 50–52.

6. Ананьев И.И., Ананьев П.И., Бобров А.В. Использование информационной системы для модульной организации образовательного процесса // Измерение, контроль, информатизация. Барнаул, 2007. С. 161–163.
7. Bates A.W. Teaching in a Digital Age: Guidelines for Designing Teaching and Learning. Tony Bates Associates, 2019. 767 p.
8. Скибицкий Э.Г. Дидактическое обеспечение процесса дистанционного обучения // Дистанционное образование. 2000. №1. С. 21–25.
9. Сакоян А. MOOK: революция в мире образования. URL: <http://polit.ru/article/2013/05/30/моос/> (дата обращения: 02.10.2023).
10. Применение IT-технологий в системе образования. URL: <https://www.karma-group.ru/education/> (дата обращения: 04.10.2023).
11. Мировой рынок онлайн образования. URL: <https://habr.com/ru/articles/675612/> (дата обращения: 16.11.2023).
12. Анализ рынка образовательных услуг. URL: <https://businessstat.ru/russia/services/education/> (дата обращения: 16.11.2023).
13. IT-отрасль в России и в мире: как растет рынок информационных технологий. URL: <https://delprof.ru/press-center/open-analytics/it-otrasl-v-rossii-i-v-mire-kak-rastet-rynok-informatsionnykh-tekhnologiy/> (дата обращения: 16.11.2023).

Получено 20.11.2023

Малина Алия Бахтагалиевна, к.э.н., доцент кафедры информационных технологий (ИТ) Самарского государственного технического университета (СамГТУ). 443100, Российская Федерация, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244. Магистрант кафедры информатики, прикладной математики и методики их преподавания Самарского государственного социально-педагогического университета. 443099, Российская Федерация, г. Самара, ул. М. Горького, 65/67. Тел. +7 846 278-43-11. E-mail: kuzdavletova_ab@mail.ru

Тарутин Никита Алексеевич, магистрант кафедры ИТ СамГТУ. 443100, Российская Федерация, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244. Тел. +7 846 278-43-11. E-mail: nikitarutin@mail.ru

RESEARCH AND IMPLEMENTATION OF END-TO-END TECHNOLOGIES INTO THE EDUCATIONAL SYSTEM OF THE UNIVERSITY

Malina A.B.^{1,2}, Tarutin N.A.¹

¹*Samara State Technical University, Samara, Russian Federation*

²*Samara State Social and Pedagogical University, Samara, Russian Federation*

E-mail: kuzdavletova_ab@mail.ru, nikitarutin@mail.ru

This article explores and develops innovative approaches to integrating end-to-end technologies into education. End-to-end technologies are fundamentally new technological solutions that permeate all aspects of the educational process, combining curricula, teaching methods and assessment of results together. The purpose of this article is to study and adapt end-to-end technologies in order to increase the effectiveness of education, improve the availability of educational resources, and develop critical thinking and creative skills of students. The article will analyze existing end-to-end technologies and identify the most promising approaches for implementation in the educational process. Practical tools and techniques will be developed based on the use of end-to-end technologies that can be applied in educational institutions at various levels. As part of the study, the authors also pay attention to the aspect of training teaching staff to use end-to-end technologies. It is noted that the integration of these technologies, in addition to technical, also requires pedagogical training.

Keywords: *end-to-end technologies, digitalization of education, artificial intelligence, training, quality of education*

DOI: 10.18469/ikt.2023.21.2.13

Malina Aliya Bakhtagalievna, Samara State Technical University, 244, Molodogvardeyskaya Street, Samara, 443100, Russian Federation; Associate Professor of Information Systems Department, PhD in Economics. Samara State Social and Pedagogical University, 65/67, M. Gorky Street, Samara, 443099, Russian Federation; Master's Degree Student of Informatics, Applied Mathematics and Methods of their Teaching Department. Tel. +7 846 278-43-11. E-mail: kuzdavletova_ab@mail.ru

Tarutin Nikita Alekseevich, Samara State Technical University, 244, Molodogvardeyskaya Street, Samara, 443100, Russian Federation; Master's Degree Student of Information Systems Department. Tel. +7 846 278-43-11. Email: nikitartutin@mail.ru

References

1. Andreev A.A. Didactic foundations of distance learning. URL: <https://studylib.ru/doc/3667317/5.andreev-a.a.-didakticheskie-osnovy-distancionnogo-obucheniya> (accessed: 09.10.2023). (In Russ.)
2. Zakharova I.G. *Information technologies in education: Textbook*. Moscow: Academiya, 2005, 192 p.
3. Fedoseev A.A. Designing educational activities as a methodological basis for introducing information technologies into education. *Sistemy i sredstva informatiki*. Moscow: Nauka, 1995, vol. 5, pp. 160–163. (In Russ.)
4. Petukhova E.I. Information technologies in education. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2013, no. 10, pp. 80–81. (In Russ.)
5. Aksyukhin A.A., Vitsen A.A., Meksheneva Zh.V. Information technologies in education and science. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*, 2009, no. 11, pp. 50–52. (In Russ.)
6. Ananyev I.I., Ananyev P.I., Bobrov A.V. Using an information system for the modular organization of the educational process. *Izmerenie, kontrol', informatizaciya*. Barnaul, 2007, pp. 161–163. (In Russ.)
7. Bates A.W. *Teaching in a Digital Age: Guidelines for Designing Teaching and Learning*. Tony Bates Associates, 2019, 767 p.
8. Skibitsky E.G. Didactic support for the process of distance learning. *Distancionnoe obrazovanie*, 2000, no. 1, pp. 21–25. (In Russ.)
9. Sakoyan A. MOOC: a revolution in the world of education. URL: <http://polit.ru/article/2013/05/30/mooc/> (accessed: 02.10.2023). (In Russ.)
10. Application of IT technologies in the education system. URL: <https://www.karma-group.ru/education/> (accessed: 04.10.2023). (In Russ.)
11. Global online education market. URL: <https://habr.com/ru/articles/675612/> (accessed: 16.11.2023). (In Russ.)
12. Analysis of the educational services market. URL: <https://businessstat.ru/russia/services/education/> (accessed: 16.11.2023). (In Russ.)
13. IT industry in Russia and in the world: how the information technology market is growing/. URL: <https://delprof.ru/press-center/open-analytics/it-otrasl-v-rossii-i-v-mire-kak-rastet-rynok-informatsionnykh-tekhnologiy/> (accessed: 16.11.2023). (In Russ.)

Received 20.11.2023

УДК 004.588

МОБИЛЬНЫЙ ПРЕПОДАВАТЕЛЬ: ПРЕИМУЩЕСТВА И НЕДОСТАТКИ В ОБРАЗОВАНИИ

Романенко О.В., Студяникова М.А.

Оренбургский филиал Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики, Оренбург, РФ

E-mail: romanenko.olesia@mail.ru, studyannikovam@mail.ru

В статье рассмотрен феномен «мобильный преподаватель» как один из самых современных образовательных средств, активно используемый преподавателями и обучающимися в процессе изучения дисциплин. В работе дается характеристика понятия «мобильный преподаватель», «мобильное образование» отечественных и зарубежных исследователей с дидактической и технологической точек зрения. В статье прилагается формулировка о необходимости и важности внедрения мобильных технологий, «мобильного преподавателя», в частности, взятая из Федерального проекта «Государственной программы Российской Федерации «Развитие образования» на 2018–2025 годы» и утвержденная постановлением Правительства Российской Федерации от 26 декабря 2017 №1642. В

работе приводятся преимущества и недостатки использования платформы «мобильный преподаватель» на аудиторных занятиях; выявляются сложности, возникающие у учащихся и их преподавателей при адаптации данной платформы в учебном процессе.

Ключевые слова: *мобильный преподаватель, электронная связь, цифровое образование, дистанционное образование, мобильное образование, непрерывное образование, информационная грамотность*

Введение

В современном учебном образовании все более популярным и распространенным способом преподавания учебного предмета (дисциплины) является использование планшетов, ноутбуков, смартфонов. Термин «мобильный преподаватель» является трендовым словом, под которым скрывается любой проект электронного обучения. Каким бы модным не было бы средство обучения, оно, прежде всего, является устройством, сопровождающим и поддерживающим учебный прогресс в обучении.

Является ли мобильное приложение 100%-ой гарантией успешного изучения предмета? Конечно же, нет! Только совокупность заинтересованных лиц учебного процесса, студенты, преподаватели, руководство, родители с совместным применением мобильных пособий могут повлиять на успех изучения того или иного предмета. Принятие решения использовать на занятиях «мобильный преподаватель», а также выбор мобильных устройств и программного обеспечения будет влиять на качество обучения только в том случае, если мобильное внедрение будет принято обеими учебными сторонами. При этом важным фактором является настроенность преподавателей и студентов на данное обучение с применением электронных средств.

Современный мир, как и современное образование, характеризуется наличием инфокоммуникационных технологий, включающих широкое использование телекоммуникационных и информационных технологий в нашей жизни: использование мобильной связи и сети Интернет в целях коммуникации и информации, внедрение компьютерных классов и их модернизация, установление интерактивных досок, подключение высокоскоростного интернета, демонстрация презентаций в ходе учебных занятий, выполнение электронных тестов, совершение виртуальных путешествий и игр.

Мобильное образование – новый этап в развитии Российского образования

Необходимость и важность внедрения мобильных технологий в образовательный процесс подчеркивается также в Федеральном проекте «Государственной программы Российской Фе-

дерации «Развитие образования» на 2018-2025 годы», утвержденном постановлением Правительства Российской Федерации от 26 декабря 2017 №1642 «К 2024 году создать необходимые условия для внедрения современной и безопасной цифровой образовательной среды, обеспечивающей формирование ценности к саморазвитию и самообразованию у обучающихся образовательных организаций всех видов и уровней, путем обновления информационно-коммуникационной инфраструктуры, подготовки кадров, создания федеральной цифровой платформы». К 2024 году во всех субъектах Российской Федерации будет введена целевая модель цифровой образовательной среды [1].

Что же такое «мобильный преподаватель», «мобильное образование»? Существуют разные мнения и точки зрения, касающиеся данного термина, которые можно трактовать с двух противоположных взглядов: с технологической и дидактической точек зрения. Так, например, Логинова А.В. рассматривает «мобильное образование» как форму обучения, «при которой отсутствуют требования для нахождения студента в учебном месте» [2].

Похожую трактовку понятия «мобильное образование» дает Вульфович В.Е.:

«Это использование мобильных телефонов, смартфонов, коммуникаторов, карманных портативных компьютеров, ноутбуков, нетбуков, планшетных компьютеров, MP4-плееров в преподавании и обучении независимо от места и времени» [3].

Титова С.В. и Авраменко А.П. рассматривают мобильное обучение как передачу и получение учебной информации с использованием технологий WAP и GPRS на любое портативное мобильное устройство, с помощью которого можно выйти в Интернет, получить и найти информацию, ответить на вопросы в форуме, сделать тест и т.д. [4]. Вышеназванные определения подчеркивают технологические особенности мобильных устройств при мобильном обучении, обеспечивающие обучение при помощи беспроводных и мобильных телефонных сетей независимо от места нахождения учащегося.

С точки зрения дидактических особенностей мобильное изучение трактуется Бондаренко Н.Г. «процессом получения знаний посредством взаимодействия людей в различных контекстах и си-

туациях с использованием мобильных электронных устройств, обеспечивающих интерактивный характер взаимодействия в целях облегчить, поддержать, улучшить и расширить сферу преподавания и обучения» [5].

Вышеназванные формулировки термина «мобильное образование» подчеркивают инфокоммуникационную значимость использования мобильных устройств в процессе образования; концентрируют внимание на таких понятиях как «информация», «сбор», «хранение», «обработка информации», «использование средств вычислительной техники и средств в телекоммуникации».

Использование мобильных устройств в образовании требует пересмотра как методического материала, используемого во время обучения, так и механизма взаимодействия учителей и обучающихся [6].

Мы как преподаватели не должны отставать от реальности и смело пользоваться цифровыми и телекоммуникационными средствами в учебном процессе, чтобы с легкостью и без страха подготовить учащихся к информационному миру. Поскольку учитель-преподаватель – это специалист, владеющий многочисленными профессиональными качествами, одним из которых является профессионально-педагогическая мобильность, заключающаяся в изменении содержания, характера и условий труда педагога [7]. К тому же данное качество выражается в изменении педагогами не только профессии, специальности, специализации, но и квалификации, должности, места работы и т.п. [8].

Постепенный переход от классического преподавания в цифровое образование является неотъемлемой частью нашей жизни: он ускоряет процесс образования, расширяет способы получения информации (образовательные порталы, приложения), делает учебный процесс мобильней (дистанционное образование) и увлекательней, расширяет границы коммуникации преподавателя и учащегося. Безусловно, быть всегда доступным для учащегося – это сложный процесс, требующий времени и терпения. Многие преподаватели испытывают информационный стресс от постоянного взаимодействия с инфокоммуникационными технологиями как на работе, так и вне ее.

Таким образом, использование «мобильного преподавателя» на учебных занятиях является многогранным и эффективным средством проработки учебного материала, зависящим от решения самого преподавателя, от субъективных фак-

торов, от технического оснащения школы.

Безусловно, платформа «мобильный преподаватель» имеет множество достоинств и удобств, позволяющая экономить время и силы преподавателя при подготовке к уроку и выполнении проверки тестовых заданий. Кроме того, система привлекательна и интересна для учащихся не только в образовательных целях, но и в качестве досуга: здесь можно найти интересующую тебя информацию, поиграть, пообщаться с одноклассниками, выполнить совместный проект.

Среди преимуществ использования мобильного преподавателя на занятиях является: мобильность, непрерывность образования, персонализированное образование, улучшение качества связи, возможность применять новейшие технологии в обучении, низкая стоимость обучения, создание интересной, веселой и удобной атмосферы для обучения. К достоинствам мобильного обучения Погуляев Д.В. относит: повсеместность, доступность, удобство, мгновенное подключение к Интернету с мобильного телефона, персонализацию [9]. Шишкова Ю.В. выделяет доступность и простоту использования материала, интерактивность, возможность самоконтроля и самооценки как общепедагогические принципы мобильного обучения [10].

Несмотря на преобладающие преимущества в использовании «мобильного обучения» на занятиях, мобильные устройства, как и другие цифровые технологии, имеют некоторые сложности в учебном процессе. «Мобильный преподаватель» не может определить эмоциональное состояние студента, мгновенно дать обратную связь, помочь в решении затруднений. Кроме того, длительное пребывание за гаджетом негативно сказывается на здоровье не только глаз, но и психического состояния, снижается работоспособность и умственная активность. Субъективные факторы также негативно сказываются на внедрении цифровых технологий, в частности «мобильного образования» в учебный процесс. Не все преподаватели с легкостью переходят на новый уровень учебного процесса, их одолевает страх и опасение перед неизведанным, освоением инновационных технологий. Не все преподаватель готовы выходить из зоны комфорта и преодолевать внутреннее сопротивление.

Не только эмоциональные, субъективные, но и технические, и социально-образовательные проблемы возникают у учащихся в учебном процессе при использовании мобильного преподавателя. Среди технических неполадок можно обозначить такие распространенные проблемы как

проблему доступа к сети Интернет, низкий объем памяти мобильного устройства, отсутствие единых стандартов в отношении мобильных платформ, некомфортное использование устройств по причине небольших размеров экрана и клавиш, а также риски, связанные с потерей мобильного устройства.

К социально-образовательным проблемам относятся:

- проблема оценивания работы студентов и их последующих результатов;
- проблема информационной безопасности студентов и образовательного контента;
- проблема перехода от классического образования к мобильному изучению из-за страха внедрения новых технологий;
- отсутствие возможности приобрести соответствующее мобильное устройство с необходимой памятью и функциями для мобильного обучения;
- отсутствие педагогической практики и теории в мобильном образовании.

Заключение

Внедрение цифровых технологий в общем и «мобильного преподавателя» в частности в систему образования – это неизбежный процесс научно-технического прогресса. Жизнь современных людей трудно представить без компьютеров и гаджетов. Использование цифровых технологий в обучении помогает подготовить человека к жизни в информационном обществе, где крайне важными являются навыки использования электронных устройств и умение ориентироваться в бесконечных потоках информации. Безлимитный доступ к учебному материалу увеличивает возможности сделать занятие ярким и незабываемым с точки зрения дидактического материала, облегчает физическую работу преподавателей в разработке учебно-методических материалов и в контроле знаний и результатов студентов, расширяет временные и локальные границы осуществления учебной деятельности, мотивирует учащихся к непрерывному образованию и обучению на протяжении всей жизни.

Литература

1. Государственная программа Российской Федерации «Развитие образования»: [утверждена постановлением Правительства Российской Федерации от 26 декабря 2017 г. № 1642]. URL: <https://docs.edu.gov.ru/document/3a928e13b4d292f8f71513a2c02086a3/download/1337/?ysclid=lowf4rzdjo317857842> (дата обращения: 19.11.2023).
2. Логинова А.В. Смешанное обучение: преимущества, ограничения и опасения // Молодой ученый. 2015. № 7 (87). С. 809–811.
3. Вульфович Е.В. Роль мобильного обучения в оптимизации преподавания иностранных языков. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rol-mobilnogo-obucheniya-v-optimizatsii-prepodavaniya-inostrannyh-yazykov/viewer> (дата обращения: 2.11.2023).
4. Титова С.В., Авраменко А.П. Мобильное обучение иностранным языкам. М.: Икар, 2013. 224 с.
5. Бондаренко Н.Г. Понятие «Мобильное обучение». URL: <https://studylib.ru/doc/2628730/> (дата обращения: 13.11.2023).
6. Голицына И.Н., Половникова Н.Л. Мобильное обучение как новая технология в образовании. URL: http://library.istu.edu/bulletin/art_tech_2009_05.pdf (дата обращения: 16.11.2023).
7. Ведерникова Л.В. Профессионально-педагогическая мобильность: теория и практика: монография. Ишим: Изд-во Ишимского государственного педагогического университета им. П.П. Ершова, 2011. 143 с.
8. Кугель С.А. Профессиональная мобильность в науке. М.: Мысль, 1983. 256 с.
9. Погуляев Д.В. Возможности применения мобильных учителей в учебном процессе // Прикладная информатика. 2006. № 5. С. 80–85.
10. Шишковская Ю.В. Использование мобильных устройств в педагогической практике // Молодой ученый. Педагогика. 2015. С. 1519–1521.

Получено 30.11.2023

Романенко Олеся Викторовна, к.ф.н., доцент кафедры гуманитарных и социально-экономических дисциплин Оренбургского филиала Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики (ОФ ПГУТИ). 460022, Российская Федерация, г. Оренбург, ул. Пролетарская, 249. Тел. +7 961 934-39-95. E-mail: romanenko.olesia@mail.ru

Студяникова Марина Александровна, к.п.н., доцент кафедры математических и естественно-научных дисциплин ОФ ПГУТИ. 460022, Российская Федерация, г. Оренбург, ул. Пролетарская, 249. Тел. +7 905 819-44-82. E-mail: studyanikovam@mail.ru

MOBILE TEACHER: ADVANTAGES AND DISADVANTAGES IN EDUCATION*Romanenko O.V., Studyannikova M.A.**Orenburg Branch of the Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics,
Orenburg, Russian Federation**E-mail: romanenko.olesia@mail.ru, studyannikovam@mail.ru*

The article considers the phenomenon of «mobile teacher» as one of the most modern educational tools actively used by teachers and students in the process of studying disciplines. The paper describes the concept of «mobile teacher», «mobile education» of domestic and foreign researchers from a didactic and technological point of view. The article contains a formulation on the need and importance of introducing mobile technologies, «mobile teacher» in particular, taken from the Federal draft «State Program of the Russian Federation «Development of Education» for 2018-2025» and approved by Decree of the Government of the Russian Federation dated December 26, 2017 No. 1642. The paper presents the advantages and disadvantages of using the mobile teacher platform; identifies the difficulties that arise for students and their teachers when adapting this platform in the educational process.

Keywords: *mobile teacher, electronic communication, digital education, distance education, mobile education, continuing education, information literacy*

DOI: 10.18469/ikt.2023.21.2.14

Romanenko Olesya Viktorovna, Orenburg Branch of the Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 249, Proletarskaya Street, Orenburg, 460022, Russian Federation; Associate Professor of Humanities and Socio-Economic Disciplines Department, PhD in Philological Science. Tel. +7 961 934-39-95. E-mail: romanenko.olesia@mail.ru

Studyannikova Marina Alexandrovna, Orenburg Branch of the Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 249, Proletarskaya Street, Orenburg, 460022, Russian Federation; Associate Professor of Mathematical and Natural Sciences Department, PhD in Pedagogical Science. Tel. +7 905 819-44-82. E-mail: studyannikovam@mail.ru

References

1. The State program of the Russian Federation «Development of Education»: [adopted by the Decree of the Government of the Russian Federation dated December 26, 2017 No. 1642]. URL: <https://docs.edu.gov.ru/document/3a928e13b4d292f8f71513a2c02086a3/download/1337/?ysclid=low-f4rzdjo317857842> (accessed: 19.11.2023). (In Russ.)
2. Loginova A.V. Mixed learning: advantages, limitations and concerns. *Molodojuchenyj*, 2015, no. 7 (87), pp. 809–811. URL: <https://moluch.ru/archive/87/16877/> (accessed: 13.11.2023). (In Russ.)
3. Vulfovich E.V. The role of mobile learning in optimizing the teaching of foreign languages. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rol-mobilnogo-obucheniya-v-optimizatsii-prepodavaniya-inostrannyh-yazykov/viewer> (accessed: 2.11.2023). (In Russ.)
4. Titova S.V., Avramenko A.P. *Mobile teaching of foreign languages*. Moscow: Ikar, 2013, 224 p. (In Russ.)
5. Bondarenko N.G. The concept of «Mobile training». URL: <https://studylib.ru/doc/2628730/> (accessed: 13.11.2023). (In Russ.)
6. Golitsyna I.N., Polovnikova N.L. Mobile learning as a new technology in education. URL: http://library.istu.edu/bulletin/art_tech_2009_05.pdf. (accessed: 16.11.2023). (In Russ.)
7. Vedernikova L.V. *Professional and pedagogical mobility: theory and practice: Monograph*. Ishim: Izd-vo Ishimskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta im. P.P. Ershova, 2011, 143 p. (In Russ.)

8. Kugel S.A. *Professional mobility in science*. Moscow: Mysl, 1983, 256 p. (In Russ.)
9. Pogulyaev D.V. Possibilities of using mobile teachers in the educational process. *Prikladnaya informatika*, 2006, no. 5, pp. 80–85. (In Russ.)
10. Shishkovskaya Yu.V. The use of mobile devices in teaching practice. *Molodoj uchenyj. Pedagogika*, 2015, pp. 1519–1521. (In Russ.)

Received 30.11.2023