

2023



1(21)

ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Infokommunikacionnye
Tehnologii



ISSN 2073-3909

«Инфокоммуникационные технологии»

Периодический научно-технический и информационно-аналитический журнал
Том 21, № 1 (81), 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 00.00.0000
Цена свободная. 0+. Тираж 100 экз.
Отпечатано в типографии ООО «Слово».
443070, Российская Федерация, г. Самара,
ул. Песчаная, 1. Тел. +7 846 267-36-82
E-mail: izdatkniga@yandex.ru

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИЙ ПЕРЕДАЧИ И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ И СИГНАЛОВ

Тарасов В.Н.	Программные генераторы в среде GPSS WORLD для распределений вероятностных смесей и оценка их качества	7
--------------	---	---

Лихтциндер Б.Я., Моисеев В.И.	Алгоритмы генерации групповых потоков случайных событий	14
----------------------------------	--	----

ТЕХНОЛОГИИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

Горячкин О.В.	Слепая идентифицируемость линейной динамической модели канала связи	22
---------------	--	----

СЕТИ СВЯЗИ И МУЛЬТИСЕРВИСНЫЕ УСЛУГИ

Глушак Е.В., Сенгилевцев О.А.	Разработка и исследование макета сети VAN для мониторинга состояния здоровья человека	28
----------------------------------	--	----

АНТЕННЫ, АФУ И УСТРОЙСТВА СВЧ

Котков К.В., Минкин М.А.	Антенны для размещения на беспилотных летательных аппаратах	36
-----------------------------	--	----

РАДИОПЕРЕДАЮЩИЕ И РАДИОПРИЕМНЫЕ УСТРОЙСТВА, ТЕЛЕВИДЕНИЕ

Карякин В.Л.	Системные требования к оборудованию телевизионного вещания в России	44
--------------	--	----

Старцев Д.Ю., Логинов И.В., Сосунов В.Г., Плыгунов О.В.	Численный метод расчета мест размещения ретрансляторов систем безопасности на местности с препятствиями	53
--	---	----

ТЕХНОЛОГИИ КОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМ И СЕТЕЙ

Обухов С.А., Елагин В.С.	Модели распределенного искусственного интеллекта в перспективных сетях связи	63
-----------------------------	---	----

НОВЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Васин Н.Н.	Методы и средства квантовой криптографии	73
------------	--	----

**ТЕХНОЛОГИИ РАДИОСВЯЗИ, РАДИОВЕЩАНИЯ И
ТЕЛЕВИДЕНИЯ**

Елисеев С.Н., Степанова Н.В.	Определение порогового решения для канала с релейскими замираниями при зондировании спектра когнитивного радио энергетическим детектором	82
---	---	-----------

Диязитдинов Р.Р.	Метод итерационного совмещения телевизионных сигналов на базе линеаризации для систем технического зрения	88
-------------------------	--	-----------

**УПРАВЛЕНИЕ И ПОДГОТОВКА КАДРОВ ДЛЯ
ОТРАСЛИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ**

Диязитдинова А.Р., Женгурова В.В.	Разработка модуля СППР при формировании сметы для клиентов ИТ-компаний	95
--	---	-----------

CONTENTS

THEORETICAL FOUNDATIONS OF INFORMATION AND SIGNAL TRANSMISSION AND PROCESSING TECHNOLOGIES

Tarasov V.N.	Software generators in the GPSS WORLD environment for distributions-probability mixtures with quality assessment results	7
---------------------	---	----------

Likhttsinder B.Ya., Moiseev V.I.	Batch arrival flow generation algorithms	14
---	---	-----------

TELECOMMUNICATION TECHNOLOGIES

Goryachkin O.V.	Blind identifiability of a linear dynamic communication channel model	22
------------------------	--	-----------

COMMUNICATION NETWORKS AND MULTI-SERVICES

Glushak E.V., Sengilevtcev O.A.	Development and research of the BAN network layout for human health monitoring	28
--	---	-----------

ANTENNAS, ANTENNA FEED SYSTEM, MICROWAVE DEVICE

Kotkov K.V., Minkin M.A.	Antennas for installation on unmanned aerial vehicles	36
-------------------------------------	--	-----------

RADIO TRANSMITTING AND RECEIVING DEVICES, TELEVISION

Karyakin V.L.	System requirements for television broadcasting equipment in Russia	44
----------------------	--	-----------

Startsev D.U., Loginov I.V., Sosunov V.G., Pligunov O.V.	Numerical method for calculating of the locations for safety system repeaters on terrain with obstacles	53
---	--	-----------

COMPUTER NETS AND SYSTEMS TECHNOLOGIES

Obukhov S.A., Elagin V.S.	Distributed artificial intelligence models in perspective communication networks	64
--------------------------------------	---	-----------

NEW INFORMATION TECHNOLOGIES

Vasin N.N.	Quantum cryptography methods and instruments	73
-------------------	---	-----------

RADIO TELECOMMUNICATION, RADIOBROADCASTING AND TELEVISION TECHNOLOGIES

Eliseev S.N., Stepatova N.V.	Determination of the threshold solution for a channel with rayleigh fading when probing the cognitive radio energy detector spectrum	82
---	---	-----------

Diyazitdinov R.R.	Method of iterative combination of TV signals for machine vision systems based on linearization	88
MANAGEMENT AND TRAINING FOR THE TELECOMMUNICATIONS INDUSTRY		
Diyazitdinova A.R., Zhengurova V.V.	Development of a DSS module when preparing assessments for IT company clients	95

«Infokommunikacionnye tehnologii»

Periodic technical and scientific information and analytical magazin
2023, vol. 21, no. 1 (81)

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);

Likhtsinder 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 004.942

ПРОГРАММНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ В СРЕДЕ GPSS WORLD ДЛЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ВЕРОЯТНОСТНЫХ СМЕСЕЙ И ОЦЕНКА ИХ КАЧЕСТВА

*Тарасов В.Н.**Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ**E-mail: v.tarasov@psuti.ru*

В данной статье приводятся полученные результаты по оценке качества представленных в [1; 2] программных генераторов псевдослучайных последовательностей для имитационного моделирования систем массового обслуживания, включающих гиперэрланговское и гиперэкспоненциальное распределения второго порядка, что является логическим продолжением указанных работ. Эти законы распределения востребованы в теории массового обслуживания, как обеспечивающие большой диапазон изменения коэффициента вариации, играющего важную роль при расчете средней задержки в очереди. В научной литературе, а также в самой библиотеке GPSS WORLD отсутствуют данные по таким генераторам. Оценка качества программных генераторов независимо от языка программирования обычно проводится на основе статистических тестов. При этом используются критерии согласия Пирсона или Колмогорова-Смирнова. Кроме того, сравниваются между собой теоретические и статистические моменты соответствующего порядка. В отличие от простых законов распределений, для которых применение вышеназванных статистических тестов предусмотрено в известных программных продуктах и не вызывает никаких затруднений, в нашем случае использование автоматического тестирования исключено. В известных пакетах STATISTICA, STATGRAPHICS, Matlab/Simulink и др. не предусмотрено использование рассматриваемых нами гиперэрланговского и гиперэкспоненциального законов распределений. Поэтому статистический тест Пирсона вычисляется и проверяется вручную. Представленные результаты должны быть полезны специалистам по дискретно-событийному моделированию в среде GPSS WORLD.

Ключевые слова: система моделирования GPSS WORLD, генераторы псевдослучайных последовательностей, СМО $H_2/M/1$ и $H_2/M/1$, среднее время ожидания в очереди, средняя длина очереди

Введение

Имитационному моделированию и, в частности, универсальной системе дискретно-событийного моделирования GPSS WORLD, которая широко используется при моделировании систем массового обслуживания и производственных систем, посвящено много работ [3–9]. Система GPSS WORLD включает множество библиотечных программ, в том числе генераторы псевдослучайных последовательностей для различных законов распределений.

В теории массового обслуживания востребованы законы распределений с широким диапазоном коэффициента вариации случайной величины, такие как гиперэрланговский или гиперэкспоненциальный. Как было отмечено в [1; 2], таких генераторов в системе моделирования GPSS WORLD нет, как их нет и в других системах имитационного моделирования. В [1; 2] представлены эти генераторы в качестве имитационных моделей систем массового обслуживания (СМО) $H_2/M/1$ и $H_2/M/1$ соответственно на основе имеющихся в библиотеке GPSS WORLD генераторов.

Постановка задачи

В статье приводятся результаты применения статистических тестов к функционированию имитационных моделей систем $H_2/M/1$ и $H_2/M/1$ в GPSS WORLD для оценки качества программных генераторов гиперэрланговского и гиперэкспоненциального распределений. Выводы об адекватности имитационных моделей систем $H_2/M/1$ и $H_2/M/1$ делаются на основе статистического теста Пирсона, сопоставления теоретических и статистических моментов указанных распределений, а также сопоставления результатов имитации с известными результатами численно-аналитических моделей указанных систем в Mathcad.

Выше было отмечено, что в отличие от классических законов распределений, используемых в теории вероятностей, таких как равномерный, показательный, нормальный, Эрланга и других, для рассматриваемых нами распределений, применение автоматизированных систем для статистической проверки качества генерации псевдослучайных чисел невозможно.

Проверка гипотезы о гиперэрланговском распределении псевдослучайных последовательностей (ПСП) на примере СМО HE₂/M/1

Приведенную в [1] имитационную модель для СМО HE₂/M/1 дополним блоками GPSS WORLD с приведенными ниже комментариями для фиксации длин интервалов между соседними требованиями во входящем потоке для последующего построения по ним статистического ряда и гистограммы распределения интервалов поступлений. После этого представим полную имитационную модель уже без комментариев.

Пирсона придется считать вручную. Это связано с тем фактом, что в автоматизированных программных продуктах нет рассматриваемых законов распределений. Фактически это означает, что мы берем данные для переходного режима функционирования СМО. Для установившегося режима необходимо провести несколько сотен тысяч испытаний в одном прогоне. Результаты прогона с выходными данными для статистического ряда и гистограммы представлены на рисунках 1 и 2.

Окончательная имитационная модель тогда будет иметь вид:

InterArr TABLE X\$Arr,1,1,24	; Построение таблицы значений интервалов поступлений
INITIAL X\$Time,0	; для статистического ряда и гистограммы
Fun VARIABLE (AC1-X\$Time)	; Установка начального значения «Time» равному нулю
SAVEVALUE Arr,V\$Fun	; Определение функции вычисления значений интервалов
SAVEVALUE Time,AC1	; поступлений
TABULATE InterArr	; Внести в ячейку «Arr» число, определенное функцией «Fun»
MARK 2	; Внести в ячейку «Time» текущее значение абсолютного
	; модельного времени
	; Внести содержимое ячейки «Arr» в таблицу «InterArr»
	; для построения статистического ряда и гистограммы
	; Внести в ячейку «2» значение текущего абсолютного
	; модельного времени

Для прогона имитационной модели установим следующие исходные данные: возьмем коэффициент загрузки $\rho = \bar{\tau}_\mu / \bar{\tau}_\lambda = 0,9$, коэффициент вариации интервалов поступлений $c_\lambda = 2$ и единичное время обслуживания $\bar{\tau}_\mu = 1$. Отсюда параметры гиперэрланговского распределения

$$p = \frac{1}{2} + \sqrt{\frac{2(1+c_\lambda^2)-3}{8(1+c_\lambda^2)}} = 0,918, \quad 1-p = 0,082,$$

$$\lambda_1 = 3,306, \quad \lambda_2 = 0,294.$$

Тогда средние значения для формирования первой и второй фаз гиперэрланговского распределения будут равны $1/\lambda_1 = 0,303$, $1/\lambda_2 = 3,401$ единиц времени. Ширину разряда для статистического ряда установим равной единице, число испытаний в прогоне возьмем $N=500$. Таким образом, не проводя многочисленных экспериментов мы выбрали небольшой объем выборки, равный 500, с тем, что статистический критерий

```

10 InterArr TABLE X$Arr,1,1,16
20 INITIAL X$Time,0
30 P_1 EQU 0.082
40 P_2 EQU (1-P_1)
50 T_1 EQU 3.401
60 T_2 EQU 0.303
70 Fun VARIABLE (AC1-X$Time)
80 GENERATE ,,1
90 Switch TRANSFER P_1,Met_2,Met_1
100 Met_1 TRANSFER ,K1_1
110 Met_2 TRANSFER ,K1_2
120 K1_1 LOGIC S Kluch1
130 ADVANCE (T_1#7.03)
140 LOGIC R Kluch1
150 TRANSFER ,Switch
160 K1_2 LOGIC S Kluch2

```

FACILITY	ENTRIES	UTIL.	AVE.TIME	AVAIL.	OWNER	PEND	INTER	RETRY	DELAY
CHAN	501	0.980	0.966	1	860	0	0	0	22
QUEUE	MAX	CONT.	ENTRY	ENTRY(0)	AVE.CONT.	AVE.TIME	AVE.(-0)	RETRY	
QCHAN	63	23	523	3	21.673	20.468	20.586	0	
TABLE	MEAN	STD.DEV.	RANGE	RETRY	FREQUENCY	CUM.%			
INTERARR	0.944	1.759		0					
			- 1.000		417	79.73			
			1.000 - 2.000		67	92.54			
			2.000 - 3.000		10	94.46			
			3.000 - 4.000		5	95.41			
			4.000 - 5.000		4	96.18			
			5.000 - 6.000		6	97.32			
			6.000 - 7.000		4	98.09			
			7.000 - 8.000		3	98.66			
			8.000 - 9.000		1	98.85			
			9.000 - 10.000		5	99.81			
			10.000 - 11.000		1	100.00			

Рисунок 1. Результаты прогона имитационной модели в виде статистического ряда

```

170 ADVANCE (T_2#7.03)
180 LOGIC R Kluch2
190 TRANSFER ,Switch
200 GENERATE (GAMMA(11,0,T_1,2))
210 GATE LS Kluch1,Met_10
220 TRANSFER ,Met_20
230 GENERATE (GAMMA(21,0,T_2,2))
240 GATE LS Kluch2,Met_10
250 Met_20 SAVEVALUE Arr,V$Fun
260 SAVEVALUE Time,AC1
270 TABULATE InterArr
280 MARK 2
290 QUEUE QCHAN
300 SEIZE CHAN
310 DEPART QCHAN
320 ADVANCE (Exponential(31,0,1.0))
330 RELEASE CHAN
340 TERMINATE 1
350 Met_10 TERMINATE
360 START 500

```

Используя полученные данные статистического ряда о длинах интервалов между соседними требованиями, поступающими в систему (рис.1), определим статистику критерия Пирсона χ^2 . Одна из форм этого критерия имеет вид

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^K \frac{(m_i - p_i \cdot N)^2}{p_i \cdot N}. \quad (1)$$

Здесь m_i – число попаданий исследуемой случайной величины в i -й разряд статистического

ряда I, p_i – теоретические вероятности попаданий в данный разряд

$$p_i = \int_{t_{i-1}}^{t_i} [p\lambda_1^2 t e^{-\lambda_1 t} + (1-p)\lambda_2^2 t e^{-\lambda_2 t}] dt,$$

K – число разрядов, N – общее число испытаний. Если в некоторых разрядах число попаданий m_i мало, то эти разряды следует объединять с соседними, чтобы тем самым исключить случайные факторы. Для данных на рисунке 1 объединим разряды с малыми значениями $m_i = 1$ с соседними, как это показано в таблице 1.

Как известно, например из [10], статистический тест Пирсона определяет меру расхождения статистического распределения от теоретического закона распределения, в качестве которого нами выбрано гиперэрланговское распределение. Критерий (1) представляет собой случайную величину, зависящую от выбранного закона распределения, числа степеней свободы, количества разрядов статистического ряда и числа испытаний.

Для данных, представленных на рисунке 1, запишем нужные нам параметры $K = 9$ – число разрядов статистического ряда, $N = 523$ – число испытаний, определенное как число входов транзактов в модель (ENTRY). Все промежуточные вычисления статистики Пирсона для статистического ряда, представленного на рисунке 1, поместим в таблице 1. Результаты вычисления статистики Пирсона приведены в таблице 1.

По таблице критических значений критерия χ^2 для числа степеней свободы $r = 9-4 = 5$ найдем близкие значения этого критерия: 4,35 с вероятностью 0,5 и 6,06 с вероятностью 0,3. Тогда

линейная интерполяция нам дает вероятность $P = 0,43$ для значения $\chi^2 = 4,99$.

Таблица 1. Вычисления критерия Пирсона χ^2

I	m_i	p_i	\div^2
0-1	417	0,77626	0,299
1-2	67	0,14231	0,741
2-3	10	0,01731	0,099
3-4	5	0,00927	0,005
4-5	4	0,00847	0,042
5-6	6	0,00770	0,967
6-7	4	0,00679	0,057
7-9	4	0,01077	0,473
9-∞	6	0,02112	2,305
	$\Sigma=523$	$\Sigma=1,000$	$\Sigma=4,99$

Эта вероятность в статистике не маленькая, поэтому полученный в ходе прогона статистический ряд не противоречит гипотезе о том, что данные значения интервалов поступлений требований в систему HE₂/M/1 распределены по гиперэрланговскому закону.

Сравнение моментов закона распределения HE₂ показывает некоторые расхождения, что можно объяснить в данном случае с небольшим числом испытаний $N = 523$. По исходным данным, среднее значение для интервалов поступлений $10/9 = 1,111$, а коэффициент вариации равен двум. Статистические моменты равны: среднее значение 0,944 (Mean), а стандартное отклонение 1,759 (Std.Dev.), что дает коэффициент вариации 1,86. С увеличением числа испытаний, такое расхождение должно будет уменьшаться.

Проверка гипотезы о гиперэкспоненциальном распределении ПСП на примере СМО H₂/M/1

Имитационную модель СМО H₂/M/1 на GPSS WORLD, представленную в [2] для построения статистического ряда и построения гистограммы распределения дополним теми же блоками, что и для системы HE₂/M/1. Ниже представлена полная имитационная модель с учетом дополнительных блоков. Для этого случая ширину разряда статистического ряда положим равной двум, а число испытаний в прогоне – 1000. Установим для прогона исходные данные: возьмем коэффициент загрузки $\rho = \bar{\tau}_\mu / \bar{\tau}_\lambda = 0,9$, коэффициент вариации интервалов поступлений $c_\lambda = 2$ и единичное время обслуживания $\bar{\tau}_\mu = 1$. Тогда параметры гиперэкспоненциального распреде-

ления $p = \frac{1}{2}(1 + \sqrt{\frac{c_\lambda^2 - 1}{c_\lambda^2 + 1}}) = 0,887$, $1 - p = 0,113$, $\lambda_1 = 1,597$, $\lambda_2 = 0,203$. Отсюда средние значения для формирования первой и второй фаз гиперэкспоненциального распределения составляют $1/\lambda_1 = 0,626$, $1/\lambda_2 = 4,929$ единиц времени.

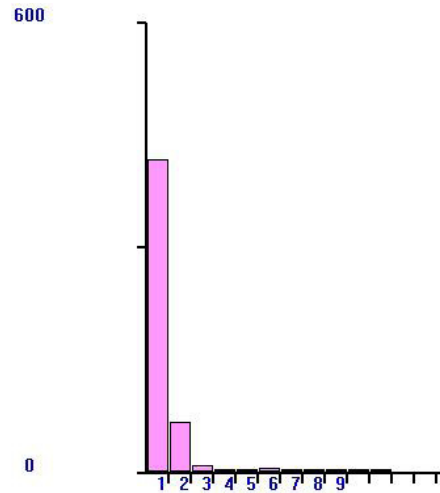


Рисунок 2. Полученная гистограмма распределения HE₂

```

10 InterArr TABLE X$Arr,2,2,14
20 INITIAL X$Time,0
30 P_1 EQU 0.113
40 P_2 EQU (1-P_1)
50 T_1 EQU 4.929
60 T_2 EQU 0.626
70 Fun VARIABLE (AC1-X$Time)
80 GENERATE ,,1
90 Switch TRANSFER P_1,Met_2,Met_1
100 Met_1 TRANSFER ,Kl_1
110 Met_2 TRANSFER ,Kl_2
120 Kl_1 LOGIC S Kluch1
130 ADVANCE (T_1#6.22)
140 LOGIC R Kluch1
150 TRANSFER ,Switch
160 Kl_2 LOGIC S Kluch2
170 ADVANCE (T_2#6.22)
180 LOGIC R Kluch2
190 TRANSFER ,Switch
200 GENERATE (Exponential(11,0,T_1))
210 GATE LS Kluch1,Met_10
220 TRANSFER ,Met_20
230 GENERATE (Exponential(21,0,T_2))
240 GATE LS Kluch2,Met_10

```

QUEUE	MAX	CONT.	ENTRY	ENTRY(0)	AVE.CONT.	AVE.TIME	AVE. (-0)	RETRY
QCHAN	69	54	1054	68	18.375	21.742	23.241	0

TABLE	MEAN	STD.DEV.	RANGE	RETRY	FREQUENCY	CUM.%
INTERARR	1.183	2.126		0		
			- 2.000		914	86.72
			2.000 - 4.000		74	93.74
			4.000 - 6.000		24	96.02
			6.000 - 8.000		17	97.63
			8.000 - 10.000		9	98.48
			10.000 - 12.000		7	99.15
			12.000 - 14.000		3	99.43
			14.000 - 16.000		2	99.62
			16.000 - 18.000		2	99.81
			18.000 - 20.000		2	100.00

Рисунок 3. Результаты прогона имитационной модели в виде статистического ряда

250 Met 20 SAVEVALUE Arr,V\$Fun
 260 SAVEVALUE Time,AC1
 270 TABULATE InterArr
 280 MARK 2
 290 QUEUE QCHAN
 300 SEIZE CHAN
 310 DEPART QCHAN
 320 ADVANCE (Exponential(31,0,1.0))
 330 RELEASE CHAN
 340 TERMINATE 1
 350 Met_10 TERMINATE
 360 START 1000

14-16	2	0,00220	0,044
16-18	2	0,00146	0,138
18-∞	2	0,00292	0,377
	Σ=1054	Σ=1,000	Σ=7,36

Результаты прогона с выходными данными для статистического ряда и гистограммы представлены на рисунках 3 и 4.

Для данных, представленных на рисунке 3, запишем нужные нам параметры $K = 10$ – число разрядов статистического ряда, $N = 1054$ – число испытаний, определенное как число входов транзактов в модель (ENTRY). Все промежуточные вычисления статистики Пирсона для статистического ряда, представленного на рисунке 3 поместим в таблицу 2.

Таблица 2. Вычисления критерия Пирсона χ^2

I	m_i	p_i	χ^2
0-2	914	0,88851	0,540
2-4	74	0,05994	1,854
4-6	24	0,01813	1,252
6-8	17	0,01119	2,297
6-10	9	0,00742	0,178
10-12	7	0,00494	0,618
12-14	3	0,00329	0,063

По таблице критических значений критерия χ^2 для числа степеней свободы $r = K - 4 = 6$ найдем близкие значения этого критерия: 7,23 с вероятностью 0,3 и 8,56 с вероятностью 0,2. Степень свободы r определяется числом наложенных связей для закона распределения. К примеру, для показательного закона с одним параметром распределения $r = K - 2$, для нормального закона с двумя параметрами $r = K - 3$. Закон распределения H_2 включает три параметра, поэтому $r = K - 4$. Линейная интерполяция значений критерия Пирсона нам дает для значения $\chi^2 = 7,36$ вероятность $P = 0,29$. Эта вероятность при проверке гипотез в статистике не маленькая, поэтому полученный в ходе прогона статистический ряд не противоречит гипотезе о том, что данные значения интервалов распределены по гиперэкспоненциальному закону.

Сравнение теоретических моментов распределения H_2 с статистическими моментами показывает также некоторые расхождения, что можно объяснить в данном случае тоже с относительно небольшим числом испытаний $N = 1054$. По исходным данным, среднее значение интервалов поступлений $10/9 = 1,111$, а коэффициент вариации равен двум. Статистические моменты равны: среднее значение 1,183 (Mean), а стандартное отклонение 2,126 (Std.Dev.), что дает коэффициент вариации 1,8. С увеличением числа испытаний можно ожидать, что такое расхождение будет уменьшаться.

В статье использованы приемы аппроксимации законов распределений с использованием моментных характеристик. Эти методы более подробно описаны в [11–16].

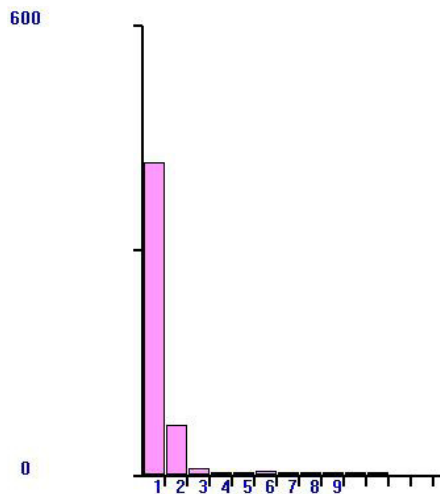


Рисунок 4. Полученная гистограмма распределения N_2

Заключение

В работе представлены разработанные в GPSS World имитационные модели функционирования СМО $HE_2/M/1$ и $H_2/M/1$ с гиперэрланговским и гиперэкспоненциальным входным распределениями второго порядка. Представлены также результаты статистических тестов для оценки качества генерирования псевдослучайных чисел по законам HE_2 и H_2 в случае переходного режима функционирования СМО. Результаты показывают удовлетворительное качество работы соответствующих представленных генераторов ПСП.

Полученные результаты публикуются впервые.

Литература

1. Тарасов В.Н., Бахарева Н.Ф., Казачков Н. А. Проблема генерирования псевдослучайных последовательностей составных распределений для имитации СМО // Инфокоммуникационные технологии. 2022. Т. 20, № 3. С. 22–29. DOI: 10.18469/ikt.2022.20.3.03
2. Тарасов В.Н., Бахарева Н.Ф. Имитационная модель СМО с гиперэкспоненциальным распределением в среде GPSS WORLD // Инфо-

коммуникационные технологии. 2022. Т. 20, № 4. С. 7–13.

3. Боев В.Д. Моделирование систем. Инструментальные средства GPSS World: учебное пособие. СПб: БХВ-Петербург, 2004. 368 с.
4. Кудрявцев Е.М. GPSS World. Основы имитационного моделирования различных систем. М.: ДМК Пресс, 2004. 320 с.
5. Алиев Т.И. Основы моделирования дискретных систем. СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. 363 с.
6. Шрайбер Т.Дж. Моделирование на GPSS. М.: Машиностроение, 1980. 592 с.
7. Тарасов В.Н., Бахарева Н.Ф. Компьютерное моделирование вычислительных систем. Теория, Алгоритмы, Программы: учебное пособие. Оренбург: Оренбургский государственный университет, 2005. 183 с.
8. Павловский Ю.Н., Белотелов Н.В., Бродский Ю.И. Имитационное моделирование. М.: Академия, 2020. 175 с.
9. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука. М.: Мир, 2019. 177 с.
10. Прикладной анализ случайных процессов / под редакцией С.А. Прохорова. Самара: СНЦ РАН, 2007. 582 с.
11. Тарасов В.Н. Расширение класса систем массового обслуживания с запаздыванием // Автоматика и телемеханика. 2018. № 12. С. 57–70.
12. Тарасов В.Н., Бахарева Н.Ф. Организация интерактивной системы вероятностного моделирования стохастических систем // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2003. Т. 5, № 1. С. 119–126.
13. Myskja A. An improved heuristic approximation for the GI/GI/1 queue with bursty arrivals // Teletraffic and datatraffic in a Period of Change, ICT-13. 1991. P. 683–688.
14. Whitt W. Approximating a point process by a renewal process: two basic methods // Operation Research. 1982. Vol. 30, no. 1. P. 125–147.
15. Gromoll H.C., Terwilliger B., Zwart B. Heavy traffic limit for a tandem queue with identical service times // Queueing Systems. 2018. Vol. 89, no. 3. P. 213–241.
16. Legros B. M/G/1 queue with event-dependent arrival rates // Queueing Systems. 2018. Vol. 89, no. 3. P. 269–301.

Получено 17.07.2023

Тарасов Вениамин Николаевич, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой управления в технических системах Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики. 443010, Российская Федерация, г. Самара, ул. Л. Толстого, 23. Тел. +7 846 228-00-13. E-mail: tarasov-vn@psuti.ru

SOFTWARE GENERATORS IN THE GPSS WORLD ENVIRONMENT FOR DISTRIBUTIONS-PROBABILITY MIXTURES WITH QUALITYASSESSMENT RESULTS

Tarasov V.N.

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

E-mail: tarasov-vn@psuti.ru

This article presents quality assessment results for the software generators of pseudo-random sequences (PRS) presented in [1; 2] for QS simulation, including second-order hyper-Erlang and hyper-exponential distributions of the second order, that flows organically from these works. These distribution laws are in demand in queuing theory as it provides a big range of changes in the variation coefficient which plays an important role in the average queue delay calculating. There is no data on such generators neither in scientific literature, no in the GPSS WORLD library. Software generator quality evaluation, regardless of the programming language, is usually made according to statistical tests. In this case, chi-squared and Kolmogorov-Smirnov's tests are used. In addition, the comparison between theoretical and statistical aspects of the corresponding order is provided. Unlike simple distribution laws, for which the use of the above mentioned statistical tests is provided for in well-known software products and does not cause any difficulties, in our case automatic testing is impossible. The well-known packages STATISTICA, STATGRAPHICS, Matlab/Simulink, etc. do not provide for the use of the hyper-Erlang and hyper-exponential distribution laws we consider. Therefore, the Pearson statistical test is calculated and checked manually. The presented results should be useful for professionals of discrete event modeling in the GPSS WORLD environment.

Keywords: *GPSS WORLD simulation system, pseudo-random sequence generators, QS HE₂/M/1 and H₂/M/1, average queue waiting time, average queue length*

DOI: 10.18469/ikt.2023.21.1.01

Tarasov Veniamin Nikolaevich, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 23, L. Tolstoy Street, Samara, 443010, Russian Federation; Head of Software and Management in Technical Systems Department, Professor. Tel. +7 846 228-00-13. E-mail: tarasov-vn@psuti.ru

References

1. Tarasov V.N., Bahareva N.F., Kazachkov N.A. The problem of generating pseudorandom sequences of composite distributions for QS simulation. *Infokommunikacionnye tekhnologii*, 2022, vol. 20, no. 3, pp. 22–29. (In Russ.)
2. Tarasov V.N., Bahareva N.F. Simulation model of a QS with hyperexponential distribution in the GPSS WORLD environment. *Infokommunikacionnye tekhnologii*, 2022, vol. 20, no. 4, pp. 7–13 (In Russ.)
3. Boev V.D. *Sistems Modeling. Tools GPSS World: Textbook*. Saint Petersburg: BKhV-Peterburg, 2004, 368 p. (In Russ.)
4. Kudryavcev E.M. *GPSS World. Fundamentals of Simulation Modeling of Various Systems*. Moscow: DMK Press, 2004, 320 p. (In Russ.)
5. Aliev T.I. *Fundamentals of Modeling Discrete Systems*. Saint Petersburg: SPbGU ITMO, 2009, 363 p. (In Russ.)
6. SHrayber T.J. *Modeling on GPSS*. Moscow: Mashinostroenie, 1980, 592 p. (In Russ.)
7. Tarasov V.N., Bahareva N.F. *Computer Modeling of Computing Systems. Theory, Algorithms, Programs: Textbook*. Orenburg: Orenburgskij gosudarstvennyj universitet, 2005, 183 p. (In Russ.)
8. Pavlovsky Yu.N., Belotelov N.V., Brodsky Yu.I. *Simulation modeling*. Moscow: Academy, 2020, 175 p. (In Russ.)
9. Shannon R. *Sistems simulation – the art and science*. Moscow: Mir, 2019, 177 p. (In Russ.)
10. *Applied analysis of random processes*. Ed. by S.A. Prokhorov. Samara: SNTs RAN, 2007, 582 p. (In Russ.)

11. Tarasov V.N. Extension of the class of queuing systems with delay. *Avtomatika i Telemekhanika*, 2018, no.12, pp. 57–70. (In Russ.)
12. Tarasov V.N., Bakhareva N.F. The outwork of interactive system for stochastic systems probability modeling. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk*, 2003, vol. 5, no. 1, pp. 119–126. (In Russ.)
13. Myskja A. An improved heuristic approximation for the GI/GI/1 queue with bursty arrivals. *Teletraffic and Datatraffic in a Period of Change*, ITC-13, 1991, pp.683–688.
14. Whitt W. Approximating a point process by a renewal process: two basic methods. *Operation Research*, 1982, vol. 30, no. 1, pp. 125–147.
15. Gromoll H.C., Terwilliger B., Zwart B. Heavy traffic limit for a tandem queue with identical service times. *Queueing Systems*, 2018, vol. 89, no. 3, pp. 213–241.
16. Legros B. M/G/1 queue with event-dependent arrival rates. *Queueing Systems*, 2018, vol. 89, no. 3, pp. 269–301.

Received 17.07.2023

УДК 621.391

АЛГОРИТМЫ ГЕНЕРАЦИИ ГРУППОВЫХ ПОТОКОВ СЛУЧАЙНЫХ СОБЫТИЙ

Лихтциндер Б.Я.¹, Моисеев В.И.²

¹ *Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ*

² *Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, РФ*

E-mail: lixt@psuti.ru, vim@psu.ru

В работе рассматриваются алгоритмические методы анализа систем массового обслуживания. Созданию программной реализации всегда предшествует разработка некоторой алгоритмической модели объекта или процесса. Арсенал алгоритмов объединяет как непрерывные, так и дискретные логические функции, что существенно расширяет возможности алгоритмических методов, по сравнению с аналитическими. Потoki пакетов в мультисервисных телекоммуникационных сетях носят явно выраженный пачечный характер и существенно отличаются от пуассоновских. Вся стройная аналитическая теория, справедливая для пуассоновских потоков, к сожалению, для пачечных потоков становится непригодной. Реальные результаты для систем массового обслуживания с пачечными потоками удастся получать с помощью имитационного моделирования, для чего требуются знания и умения алгоритмизации моделируемых процессов. В работе рассмотрены способы генерации пуассоновских, групповых пуассоновских потоков, показаны результаты моделирования групповых пуассоновских потоков. Рассмотрен программный инструмент - конвертор и приведены примеры генерации пачечных потоков с различными структурами пачек. Проведен анализ алгоритмических моделей систем массового обслуживания для различных дисциплин обслуживания. Отмечена необходимость дальнейшего развития алгоритмической теории систем массового обслуживания.

Ключевые слова: *системы массового обслуживания, групповые потоки заявок, анализ, генерация, алгоритмы, трудоемкость алгоритмов, данные, конвертор потоков*

Введение

Недостаточная эффективность представления трафика мультисервисных сетей моделями «самоподобных» процессов привела к созданию класса моделей потоков, управляемых цепью Маркова. Этапы развития указанных моделей представлены в [1]. В нашей стране они были названы МС-потоками, а в США эволюционировали от «разносторонних (versatile) потоков», через «N-потоки (потоки Ньютона) [2] до марковских входных потоков (MAP – Markovian Arrival Process) и их обобщений – групповых Марковских входных потоков (BMAP – Batch Markovian Arrival Process) [3–5]. На ранних стадиях указанных моделей интервалы поступления стацио-

нарного пуассоновского потока чередовались с интервалами, имеющими показательное распределение, где этот поток отсутствовал. (IPP-поток). Затем перешли к рассмотрению SPP-потоков, где чередовались между собою интервалы поступления нескольких стационарных пуассоновских потоков различной интенсивности. Особое место среди рассмотренных потоков занимают групповые пуассоновские потоки.

Групповые пуассоновские потоки

Под групповым пуассоновским потоком случайных событий будем понимать поток случайных событий, распределенных по закону пуассона с параметром λ . Каждое из событий заключается

в поступлении группы заявок. Частным случаем такого потока является неординарный пуассоновский поток, когда событие заключается в одновременном поступлении нескольких заявок [6; 7; 8].

Нами показано [6], что дисперсию $D_m(\rho)$ числа заявок на интервалах τ для такого потока можно определить, как

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

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

Нами также была получена формула, для определения средних значений очередей в системах массового обслуживания (СМО) с коррелированными потоками заявок [8–10]. Эта формула обобщает известную формулу Хинчина-Поллачека, которая пригодна лишь для Пуассоновских потоков. Для рассматриваемых потоков обобщенная формула определения среднего значения очереди $q(\rho)$ имеет весьма простой вид:

$$q(\rho) = \frac{\rho \bar{k}(1 + v_k^2)}{2(1 - \rho)} - \frac{\rho}{2}.$$

И, в частном случае, для обычного пуассоновского потока, когда каждая пачка имеет по одной заявке, $\bar{k} = 1$, $v_k^2 = 0$, получим формулу Хинчина-Поллачека в ее обычном виде $\bar{k} = k$, $v_k^2 = 0$.

Распределение заявок внутри пачек

Заявки могут поступать не одновременно, а быть распределены на некоторых временных интервалах, образуя пачки заявок.

Заявки внутри каждой пачки могут быть распределены произвольно, согласно принятому алгоритму. Рассмотрим следующие примеры распределения заявок на заданном постоянном интервале T .

1. Заявки каждой пачки распределены равномерно (интервалы между соседними заявками внутри пачки одинаковы).

2. Интервалы между соседними заявками внутри пачки независимы и распределены экспоненциально.

3. Интервалы между соседними заявками внутри пачки подчиняются Гамма-распределению.

Нетрудно показать, что первые два вида распределения заявок являются частными случаями третьего (в первом случае коэффициент вариации Гамма-распределения стремится к нулю, а во втором случае – к единице).

Обозначим через λ_m – условную среднюю интенсивность потока заявок внутри пачки. Тогда, среднее число заявок \bar{k} в пачке длительностью T определится соотношением $\bar{k} = \lambda_m T$. Будем поддерживать указанное среднее значение постоянным (увеличивая λ_m при уменьшении интервала T).

Рассмотрим второй случай, когда интервалы между соседними заявками внутри пачки независимы и распределены экспоненциально. Распределение числа заявок на интервале T при этом удовлетворяет закону Пуассона

$$P_k(\bar{k}) = \frac{\bar{k}^k}{k!} e^{-\bar{k}}.$$

При уменьшении значения T , все заявки пачки поступают одновременно и рассматриваемый пачечный поток стремится к неординарному групповому потоку с пуассоновским распределением числа заявок в каждой пачке. При увеличении значения T до значения $T=1/\lambda$, приходим к обычному пуассоновскому потоку, с параметром $\lambda \bar{k}$.

Подготовка данных

Для генерации групповых потоков случайных событий программным образом необходимо спроектировать блок подготовки данных, предлагаемый алгоритм которого представлен на рисунке 1.

Прежде всего, необходимо указать тип распределения интервалов генерируемого потока событий («экспоненциальный» или «Гамма»). Затем, следует указать тип распределения размеров пачки («постоянный», «экспоненциальный», «пуассоновский»), распределение интервалов между заявками внутри пачки («постоянный», «экспоненциальный», «пуассоновский»), а также указать параметры распределений $\lambda_1, \eta_1, m_1, p_1$. Необходимо задать требуемый объем выборки «targetN», и инициализировать генераторы случайных чисел: «genUniform» – генератор равномерного распределения, «genExp» – генератор экспоненциального распределения или «genPoison» – генератор распределения Пуассона. Затем, следует установить начальные значения счетчика заявок «totalN = 0» и текущее время «T1 = 0». Определяется длина временного интервала, на котором распределены заявки в пачках.

Все указанные действия могут быть объединены в один блок, который назовем «Блок подготовки данных».

Генерация потоков

После блока подготовки, следующим этапом необходимо предусмотреть блок «алгоритмов генерации потоков заявок». Рассмотрим блок –

схему предлагаемых алгоритмов генерации трех возможных типов распределения размеров пачек (рисунок 2), с учетом следующих условных обозначений: «Пост» – постоянный размер (m_1) пачки заявок; «Эксп» – экспоненциальное распределение; «Пуасс» – пуассоновское распределение, со средним значением, равным m_1 . Выбирается один из указанных типов распределений. Затем, выбирается одно из возможных распределений интервалов между заявками в пачке:

- все заявки сосредоточены в одной начальной точке интервала;
- заявки в пачке распределены равномерно по интервалу;
- интервалы между соседними заявками независимы и имеют экспоненциальное распределение.



Рисунок 1. Блок подготовки данных

Для всех типов генерации устанавливается размер цикла, равный M и выполняется указанный цикл генерации.

В первом случае, когда все заявки пачки сосредоточены во времени в одной точке, при выводе происходит многократное повторение одного и того же значения T^1 .

Во втором случае, когда интервалы между соседними заявками постоянны, то заявки распределены равномерно,

$$T^1 = \frac{dt}{M},$$

а каждый очередной момент времени T определяется по формуле $T := T + T^1$.

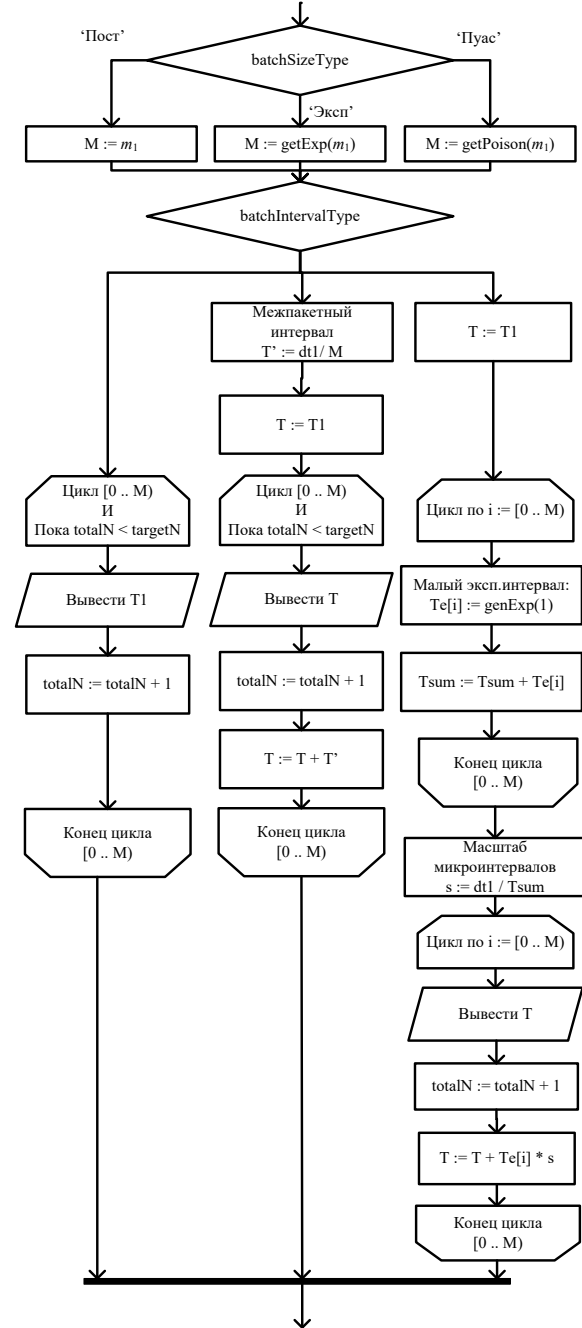


Рисунок 2. Блок-схема алгоритмов генерации потоков заявок

При экспоненциальном распределении интервалов между соседними заявками вначале генерируются случайные значения $Te[i]$, производится их суммирование, а затем, в новом цикле, производится масштабирование всех временных отрезков с масштабом s .

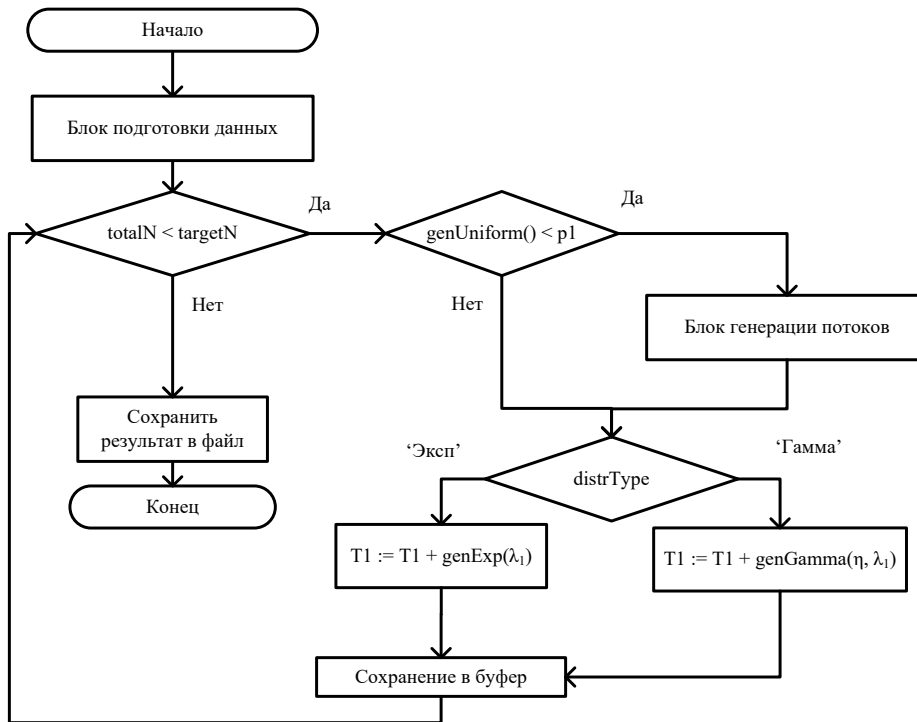


Рисунок 3. Блок-схема алгоритмов работы конвертера потоков заявок

Все рассмотренные схемы объединяются в одну блок-схему конвертера потоков заявок, представленную на рисунке 3.

Конвертер генерации потоков заявок

По рассмотренным выше алгоритмам был создан конвертер генерации групповых потоков заявок. Конвертер воспроизводит последовательности чисел, отражающих моменты времени появления каждой из заявок. Если поток не ординарный, и одновременно появляется несколько заявок, то число, отображающее указанный момент времени, повторяется столько раз, сколько заявок поступило в этот момент.

Программа позволяет генерировать два независимых потока заявок от процессов №1 и №2 и суммировать их (наложить один на другой).

Внешний процесс – порождение события

Процесс №1 может порождать события по Гамма или Экспоненциальному распределению с параметрами λ_1 и η .

Процесс №2 порождает только экспоненциальные интервалы с параметром λ_2 .

У каждого потока задается вероятность наступления события – P_1 и P_2 (1 – событие всегда наступает, 0 – никогда не наступает).

Внутренний процесс – порождение пачки

Оба потока, при наступлении события генерируют сразу пачку заявок.

Размер пачки Потока №1 определяется по одному из трех вариантов:

- всегда фиксированный размер пачки (m_1);
- размер пачки определяется согласно распределению Пуассона со средним m_1 ;
- размер пачки определяется по экспоненциальному распределению со средним m_1 (округленно до целого).

Размер пачки Потока №2 определяется всегда по закону Пуассона со средним m_2 .

Распределение пачки по интервалу

Интервалы между заявками внутри пачки генерируются в одном из нескольких режимов. Поток №1 может работать в четырех режимах:

1. Все заявки пачки в одной точке. Генерируется количество заявок m_1 в очередной пачке из распределения емкости пачки (фиксировано, экспоненциально или по Пуассону) с параметром m_1 . Все эти заявки записываются с одинаковым текущим временем. Пример для набора параметров $\{\lambda_1 = 50, m_1 = 10, P_1 = 1, \rho = 0.1\}$ и Пуассоновского распределения размеров пачек показан на рисунке 4 (здесь и далее приведены скриншоты из программного комплекса АМС [9]). На графике – число заявок на интервале обслуживания.

2. Постоянные интервалы между заявками внутри пачки. Генерируется количество заявок m_1 в очередной пачке из распределения емкости

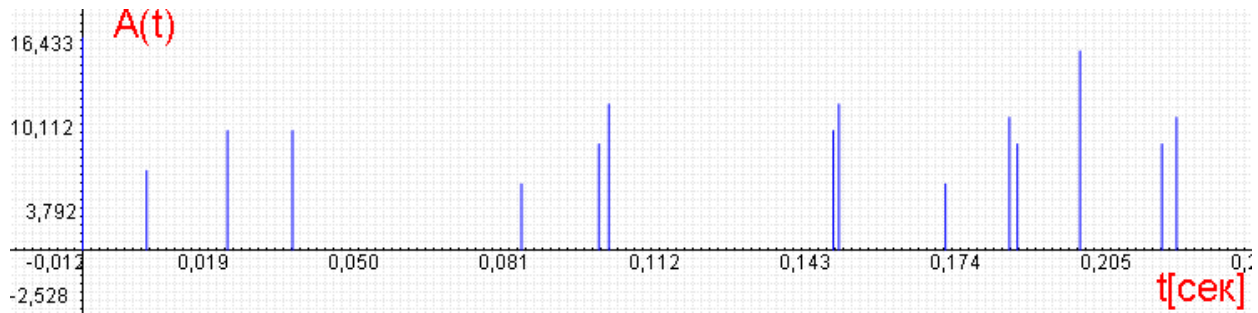


Рисунок 4. Пуассоновское распределение чисел заявок в пачках

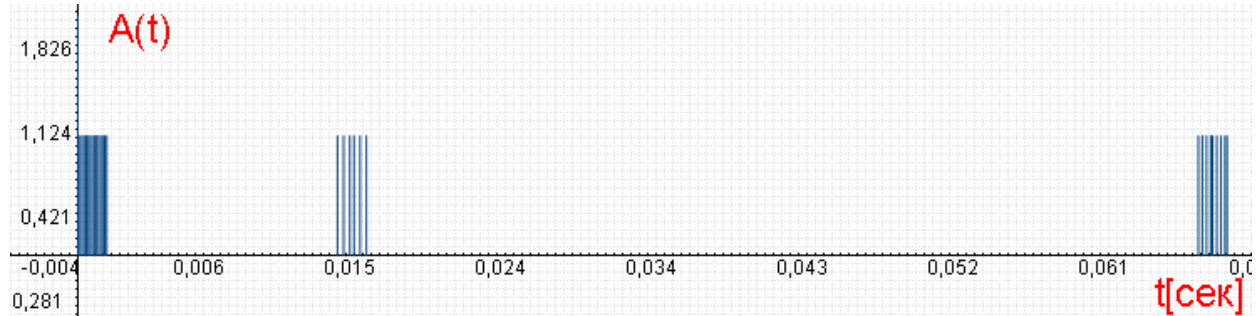


Рисунок 5. Одинаковые числа заявок в пачках

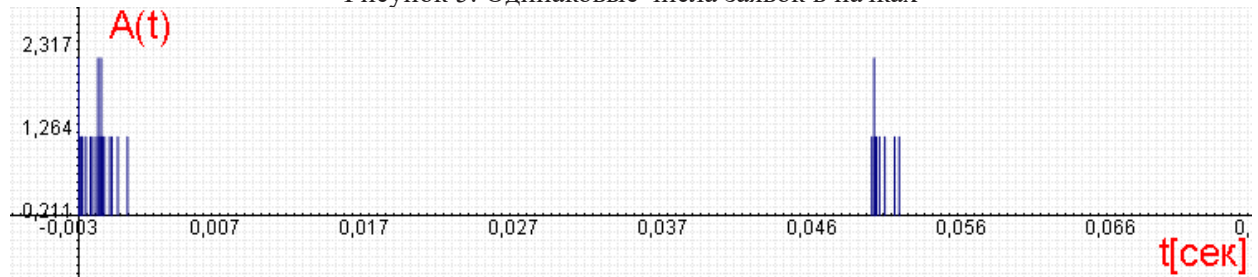


Рисунок 6. Экспоненциальное распределение чисел заявок в пачках

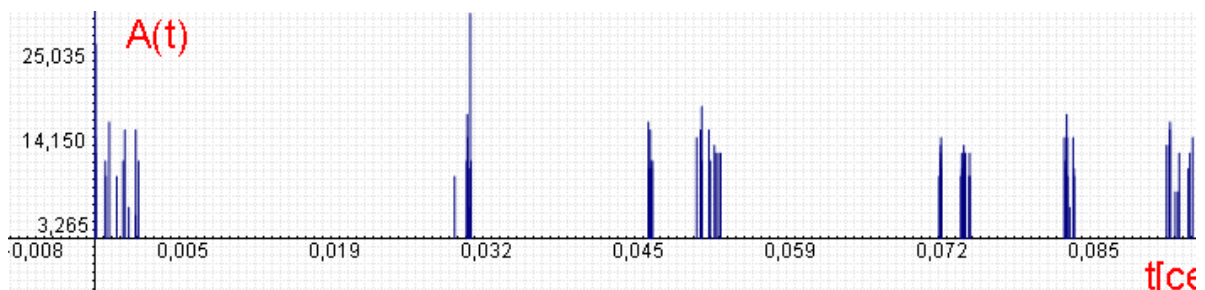


Рисунок 7. Режим размножения пачек

пачки (фиксировано, экспоненциально или по Пуассону) с параметром m_1 . Задается интервал распределения – $dt = \frac{1}{\lambda_1 m_1}$ (исходя из среднего m_1). По интервалу dt равномерно распределяются заявки текущей пачки. Пример для набора параметров $\{\lambda_1 = 50, m_1 = 10, P_1 = 1, \rho = 0.05\}$ показан на рисунке 5.

3. Экспоненциальные интервалы между заявками внутри пачки. Генерируется количество заявок m_i в очередной пачке из распределения емкости пачки (фиксировано, экспоненциально или по Пуассону) с параметром m_1 . Задается интервал размазывания – $dt = \frac{1}{\lambda_1 m_1}$ (исходя из среднего m_1). Интервал dt делится на m_i штук экс-

поненциальных микроинтервалов. В начале каждого микроинтервала вписывается заявка.

Пример для набора параметров $\{\lambda_1 = 50, m_1 = 10, P_1 = 1, \rho = 0.1\}$ и экспоненциального распределения размера пачек показан на рисунке 6.

4. Размножение пачки. Дополнительно задается:

- количество микропачек на одно событие – K (столько раз будет повторена микропачка);
- коэффициент заполнения интервала R , который может принимать значения от 0 до 1 (при $R = 0$ – все микропачки в одной точке; при $R = 1$ – микропачки распределены по всему интервалу до следующего события).

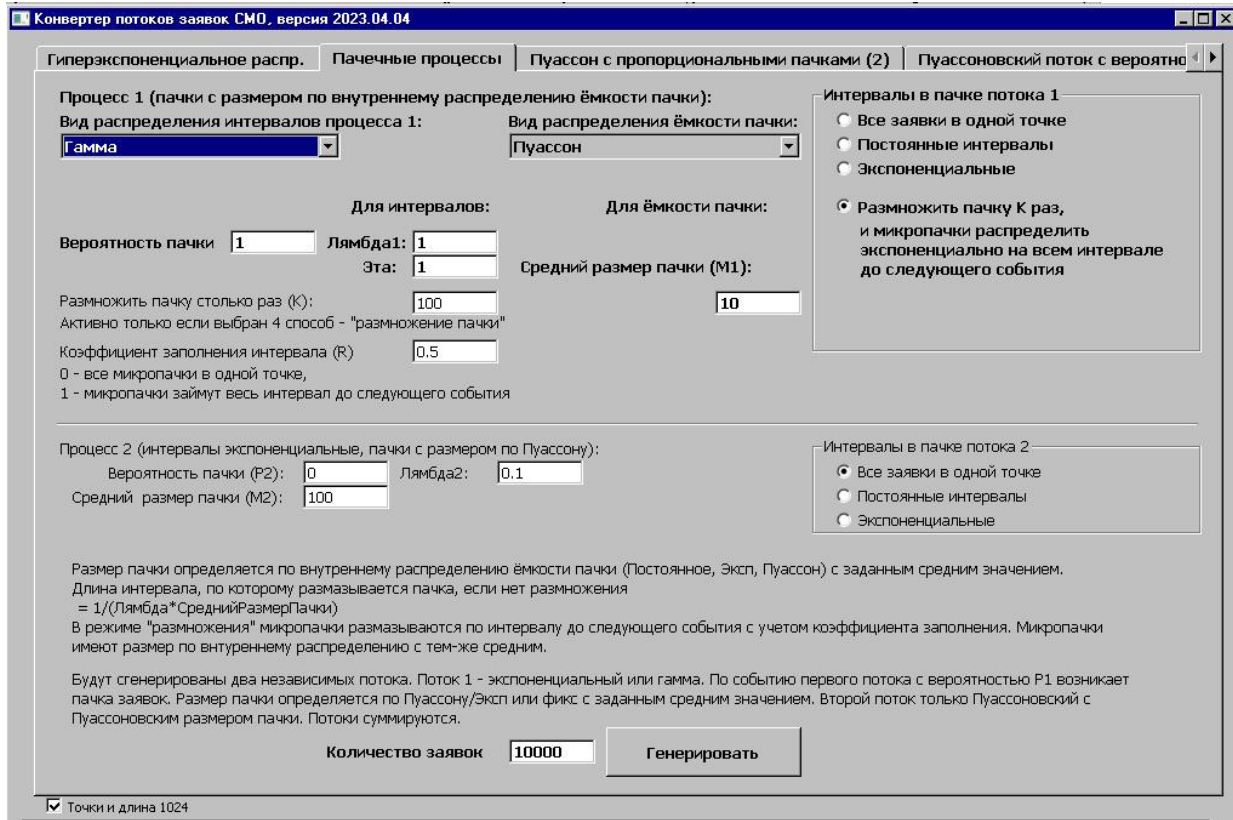


Рисунок 8. Экран взаимодействия с пользователем

Между двумя соседними событиями основного потока t_i и t_{i-1} определяется интервал распределения, пропорционально коэффициенту заполнения:

На этом интервале dt отмечаются K экспоненциальных микроинтервалов. При прохождении всех экспоненциальных микроинтервалов, для каждого из них генерируется количество заявок m_i в очередной пачке по распределению емкости пачки (фиксировано, экспоненциально или по Пуассону) с параметром m_1 . В каждой микропачке эти m_i заявок размещаются в начало своего микроинтервала.

Пример для набора параметров $\{\lambda_1 = 50, m_1 = 10, P_1 = 1, K = 10, R = 0,1, \rho = 0,1\}$ в режиме размножения пачек показан на рисунке 7.

Поток №2 работает аналогично, но только в первых трех режимах и только с Пуассоновскими интервалами.

Оба потока могут суммироваться (накладываются друг на друга), образуя общий единый поток и сохраняются в файл.

В потоках, изображенных на рисунках 4–7 использованы одинаковые параметры потока, при различных значениях коэффициента загрузки ρ .

На рисунке 8 показан экран взаимодействия системы с пользователем. На экране расположены окна управления процессами. «Вид распределения

интервалов процесса 1» позволяет установить экспоненциальное или Гамма-распределения интервалов между групповыми событиями. Окно «Вид распределения емкости пачки» позволяет установить равномерное, экспоненциальное или пуассоновское распределение числа заявок в пачках. Окно «Вероятность пачки» позволяет установить вероятность возникновения пачки в момент наступления очередного группового события, а окно «Лямбда1» служит для установки значения интенсивности возникновения групповых событий. Окно «размножение пачки K раз» предназначено для установления числа повторений пачки между двумя соседними групповыми событиями. Окно «Коэффициент заполнения интервалов» устанавливает эквивалентный коэффициент загрузки (соответствующее значение интервала времени обработки одной заявки). Средний размер пачки и количество заявок также могут быть установлены в соответствующих окнах.

Вид интервалов между заявками в пачках устанавливается отметкой в одном из окон.

Всего может быть три вида установки:

- все заявки в одной точке;
- постоянные интервалы;
- экспоненциальное распределение.

Параметры второго потока устанавливаются аналогично.

Заключение

Аналитическая теория, справедливая для пуассоновских потоков, для пачечных потоков становится непригодной. Анализ СМО таких потоков все чаще производится средствами имитационного моделирования. Алгоритмический анализ предшествует созданию программных продуктов и обеспечивает программную реализацию имитационных моделей. Модели групповых пуассоновских потоков представляют особый интерес при анализе пачечного трафика телекоммуникационных сетей. Конвертор групповых пуассоновских потоков позволяет получить потоки заявок, аналогичные по своим характеристикам потокам пачечного трафика телекоммуникационных сетей.

Литература

1. Вишневецкий В.М., Дудин А.Н. Системы массового обслуживания с коррелированными входными потоками и их применение для моделирования телекоммуникационных сетей // Автоматика и телемеханика. 2017. №8. С. 3–59.
2. Neuts M.F. A Versatile Markovian point process // Journal of Applied Probability. 1979. no. 16(04). P. 764–779. DOI:10.2307/3213143
3. Flexible Dual Connectivity Spectrum Aggregation for Decoupled Uplink and Downlink Access in 5G Heterogeneous Systems / M.A. Lema [et al.] // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2016. Vol. 34, no. 11. P. 1–12.
4. Multiband OFDMA Heterogeneous Network for Millimeter Wave 5G Wireless Applications / S. Niknam [et al.] // IEEE Access. 2016. Vol. 4. P. 640–648.
5. Vishnevsky V., Larionov A., Frolov S. Design and Scheduling in 5G Stationary and Mobile Communication Systems Based on Wireless Millimeter-Wave Mesh Networks // Distributed Computer and Communication Networks. 2014. P. 11–27.
6. Лихтциндер Б.Я. Интервальные характеристики групповых пуассоновских моделей трафика телекоммуникационных систем // Информационные технологии. 2020. Т. 18, № 3. С. 302–311.
7. Likhttsinder B.Я. Bakai Yu.O. Models of group poisson flows in telecommunication traffic control // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2020. Т. 28, № 3 (67). С. 75–89.
8. Лихтциндер Б.Я., Моисеев В.И. MAP и ВMAP-потоки в моделях трафика телекоммуникационных систем // Информационные технологии. 2020. Т. 18, № 2. С. 143–148.
9. Лихтциндер Б.Я. Трафик мультисервисных сетей доступа (интервальный анализ и проектирование). М.: Горячая линия – Телеком, 2018. 290 с.
10. Лихтциндер Б.Я. О некоторых обобщениях формулы Хинчина-Поллачека для неэкспоненциальных потоков // Информационные технологии. 2007. Т. 5, № 4. С. 15–18.

Получено 14.06.2022

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

Моисеев Виктор Игоревич, к.т.н., доцент кафедры радиоэлектроники и защиты информации Пермского государственного национального исследовательского университета. 614068, Российская Федерация, г. Пермь, ул. Букирева, 15. Тел. +7 902 83 145 30. E-mail: vim@psu.ru

BATCH ARRIVAL FLOW GENERATION ALGORITHMS

Likhttsinder B. Ya.¹, Moiseev V.I.²

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

² *Perm State University, Perm, Russian Federation*

E-mail: lixt@psuti.ru, vim@psu.ru

The article observes algorithmic methods for analyzing of queuing systems. Software implementation is always preceded by the development of some algorithmic model of an object or process. The arsenal of algorithms combines both continuous and discrete logical functions, significantly expanding possibilities of algorithmic methods compared to analytical ones. Packet flows in multiservice telecommunication networks have a clearly expressed burst character and differ from Poisson flows

significantly. The entire coherent analytic theory, which is valid for Poisson flows, unfortunately becomes unsuitable for burst flows. Real results for queuing systems with bursty flows may be obtained using simulation modeling, which requires knowledge and skills in algorithmizing of simulated processes. A software tool – a converter – is considered and examples of generating burst streams with various burst structures are presented. An analysis of algorithmic models of queuing systems for various service disciplines was conducted. The need for further development of the algorithmic theory of queuing systems is emphasized..

Keywords: *queuing systems, group flows of requests, analysis, generation, algorithms, complexity of algorithms, data, flow converter*

DOI: 10.18469/ikt.2023.21.1.02

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

Moiseev Victor Igorevich, Perm State University, 15, Bukireva Street, Perm, 614068, Russian Federation; Associate Professor at Radioelectronics and Information Security Department, PhD in Technical Sciences. Tel. +7 902 83 145 30. E-mail: vim@psu.ru

References

1. Vishnevskii V.M., Dudin A.N. Queueing systems with correlated arrival flows and their applications to modeling telecommunication networks. *Avtomatika i telemekhanika*, 2017, no. 8, pp. 3–59. (In Russ.)
2. Neuts M.F. A Versatile Markovian point process. *Journal of Applied Probability*, 1979, no. 16(04), pp. 764–779. DOI:10.2307/3213143
3. Lema M. A. et al. Flexible Dual Connectivity Spectrum Aggregation for Decoupled Uplink and Downlink Access in 5G Heterogeneous Systems. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2016, vol. 34, no. 1, pp.1–12.
4. Niknam S. et al. Multiband OFDMA Heterogeneous Network for Millimeter Wave 5G Wireless Applications. *IEEE Access*, 2016, vol. 4, pp. 640–648.
5. Vishnevsky V., Larionov A., Frolov S. Design and Scheduling in 5G Stationary and Mobile Communication Systems Based on Wireless Millimeter-Wave Mesh Networks. *Distributed Computer and Communication Networks*, 2014, pp. 11–27.
6. Likhtzinder B.Ya. Interval characteristics of group poisson models of telecommunication systems traffic. *Infokommunikacionnye tekhnologii*, 2020, vol. 18, no. 3, pp. 302–311. (In Russ.)
7. Likhtzinder B.Ya., Bakai Yu.O. Models of group poisson flows in telecommunication traffic control. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki*, 2020, vol. 28, no. 3 (67), pp. 75–89.
8. Likhtzinder B.Ya., Moiseev V.I. MAP- and BMAP-flows in traffic models of telecommunication systems. *Infokommunikacionnye tekhnologii*, 2020, vol. 18, no. 2, pp. 143–148. (In Russ.)
9. Likhtzinder B.Ya. *Traffic of multiservice access networks (interval analysis and design)*. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2018, 290 p. (In Russ.)
10. Likhtzinder B.Ya. About some generalizations of formula Hinchin Pollyachek for notexponential streams. *Infokommunikacionnye tekhnologii*, 2007, vol. 5, no. 4, pp. 15–18. (In Russ.)

Received 14.06.2022

СЛЕПАЯ ИДЕНТИФИЦИРУЕМОСТЬ ЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ
МОДЕЛИ КАНАЛА СВЯЗИ*Горячкин О.В.**Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ**E-mail: o.goryachkin@psuti.ru*

В статье рассматривается задача построения математической модели канала передачи данных в системах связи в случае, когда сигналы на входе канала оказываются неизвестными на выходе. Построение математических моделей непосредственно на основе наблюдаемых данных составляет задачу идентификации, а рассматриваемый случай относится к задаче слепой идентификации. В работе последовательно рассмотрено понятие идентифицируемости линейной динамической системы в пространстве состояний, показана связь этого понятия с понятиями наблюдаемости и управляемости. Доказан ряд утверждений об идентифицируемости линейной динамической системы, описывающей канал связи. В частности, показано, что если система идентифицируема, то для ее описания достаточно использовать модель «вход-выход», при этом модель «вход-состояние-выход» является избыточной. Далее, на основе доказанных утверждений сформулированы условия слепой идентифицируемости для случая дискретной системы с одним входом и множественным выходом, которые накладываются на компоненты передаточной матрицы системы. При этом идентифицируемость системы в обычном смысле является дополнительным условием.

Ключевые слова: канал связи, линейная динамическая модель, идентифицируемость динамической модели

Введение

В задачах, относящихся к обработке сигналов в системах связи, часто возникает проблема построения математических моделей каналов передачи непосредственно по регистрируемым данным, в условиях, когда тестирование канала испытательным импульсом невозможно или нежелательно [1; 2]. В этих случаях говорят о задаче слепой идентификации канала связи.

В большинстве практических случаев в телекоммуникациях речь идет о линейной, нестационарной модели взаимодействия входных, выходных сигналов и помех, т.е. о модели линейной динамической системы (ЛДС) [3; 4].

Задача идентификации линейной динамической системы в общем случае тесно связана с задачами управляемости и наблюдаемости. В теории автоматического управления проблема нахождения условий управляемости (возможности приведения динамической системы в заданное состояние с помощью управляющих воздействий за конечное время) и наблюдаемости (возможности определения переменных состояния по измерениям физических переменных в системе) была корректно поставлена лишь во второй половине 20-го века.

Решение проблем управляемости и наблюдаемости было найдено Р. Калманом в рамках моделей «вход-состояние-выход». В рамках данной модели предполагается, что система описывается вектором состояний, часть которых может быть недоступна для управления или наблюдения. При

этом выбор вектора состояний системы не является единственным, и для него не существует общих принципов выбора [3; 4].

В задачах идентификации систем на первое место выходит понятие идентифицируемости системы. В существующей литературе имеется большое многообразие подходов к определению этого свойства систем, зависящих, к тому же, от особенностей построения процесса идентификации [4; 6; 7].

В данной работе мы рассмотрим связь понятий идентифицируемости, наблюдаемости и управляемости ЛДС, используемых для описания систем, опираясь в основном на работу [6].

Далее мы рассмотрим задачу слепой идентифицируемости ЛДС и сформулируем условия, при которых задача имеет решение.

Слепая идентификация одномерного канала связи (SISO) часто рассматривается как возможность повышения скорости в системах передачи данных, за счет отказа от периодического тестирования канала. Однако большинство найденных способов слепой оценки параметров канала имеют низкую помехоустойчивость, что ограничивает возможность практического применения данных методов. Между тем, в системах, использующих канал с несколькими входами и выходами (MIMO) или с одним входом и несколькими выходами (SIMO) ситуация с помехоустойчивостью более оптимистичная.

Задача слепой идентификации систем связи имеет большую библиографию, с которой можно

ознакомиться, например в [8]. Теоремы слепой идентификации SIMO канала можно найти в [9], для MIMO канала в [10], для SISO канала [11].

В указанной литературе рассматриваются тематические модели систем «вход-выход», возможность использования моделей «вход-состояние-выход» остается за рамками рассмотрения. Данная статья частично восполняет этот пробел.

Управляемость и наблюдаемость динамических систем

Как известно линейная динамическая система произвольного вида, задается в дискретном времени матрицами $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}, \mathbf{D}$.

$$\begin{cases} \mathbf{u}[k+1] = \mathbf{A}\mathbf{u}[k] + \mathbf{B}\mathbf{x}[k], \\ \mathbf{y}[k] = \mathbf{C}\mathbf{u}[k] + \mathbf{D}\mathbf{x}[k], \\ \mathbf{u}[0] = 0. \end{cases} \quad (1)$$

где $\mathbf{x}[k] = [\sigma_{ij}]$, входной вектор, $\mathbf{y}[k]$ – выходной вектор, $\mathbf{u}[k]$ – вектор состояний системы, $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}, \mathbf{D}$ – постоянные матрицы.

ЛДС называется управляемой, если в отсутствии шумов для любых двух состояний $\mathbf{u}[0]$ и $\mathbf{u}[n]$, существует управляющее входное воздействие, при котором ЛДС может быть переведена из начального состояния в конечное.

Теорема 1. Критерий управляемости (Р. Калман). Динамическая система управляема тогда и только тогда, когда матрица управляемости

$$\mathbf{W}_B = (\mathbf{B} \mathbf{A} \mathbf{B} \mathbf{A}^2 \mathbf{B} \dots \mathbf{A}^{n-1} \mathbf{B})$$

имеет ранг равный n .

Запишем соответствующие состояния системы:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}[1] &= \mathbf{A}\mathbf{u}[0] + \mathbf{B}\mathbf{x}[0], \\ \mathbf{u}[2] &= \mathbf{A}\mathbf{u}[1] = \\ &= \mathbf{A}^2\mathbf{u}[0] + \mathbf{A}\mathbf{B}\mathbf{x}[0] + \mathbf{B}\mathbf{x}[1], \\ &\dots \\ \mathbf{u}[n] &= \mathbf{A}\mathbf{u}[n-1] = \\ &= \mathbf{A}^n\mathbf{u}[0] + \mathbf{A}^{n-1}\mathbf{B}\mathbf{x}[0] + \dots + \mathbf{B}\mathbf{x}[n-1]. \end{aligned}$$

Так как $\mathbf{u}[0]$ и \mathbf{A} – известны заранее, то для неизвестного управляющего воздействия можно записать систему уравнений в виде

$$\begin{aligned} \mathbf{u}[n] - \mathbf{A}^n\mathbf{u}[0] &= \mathbf{A}^{n-1}\mathbf{B}\mathbf{x}[0] + \dots + \mathbf{B}\mathbf{x}[n-1] = \\ &= (\mathbf{B} \quad \mathbf{A}\mathbf{B} \quad \dots \quad \mathbf{A}^{n-1}\mathbf{B}) \begin{pmatrix} \mathbf{x}[n-1] \\ \mathbf{x}[n-2] \\ \vdots \\ \mathbf{x}[0] \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

Если условие теоремы 1 выполняется, то решение данного уравнения относительно управляющего воздействия существует для каждого из m входов системы $\mathbf{x}[k]$.

Под наблюдаемой системой в дискретном времени будем понимать однородную систему, состояние которой $\mathbf{u}[0]$ можно в отсутствии шумов однозначно восстановить по выходным сигналам $\mathbf{y}[0], \mathbf{y}[1], \dots, \mathbf{y}[n]$.

Запишем связь выходных сигналов однородной системы и ее состояний

$$\begin{aligned} \mathbf{y}[0] &= \mathbf{C}\mathbf{u}_0 \\ \mathbf{y}[1] &= \mathbf{C}\mathbf{A}\mathbf{u}[0], \\ \mathbf{y}[2] &= \mathbf{C}\mathbf{A}\mathbf{u}[1] = \mathbf{C}\mathbf{A}^2\mathbf{u}[0], \\ &\dots \\ \mathbf{y}[n] &= \mathbf{C}\mathbf{A}\mathbf{u}[n-1] = \mathbf{C}\mathbf{A}^{n-1}\mathbf{u}[0]. \end{aligned}$$

В матричной форме можно записать

$$\begin{pmatrix} \mathbf{y}[0] \\ \mathbf{y}[1] \\ \mathbf{y}[2] \\ \dots \\ \mathbf{y}[n] \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{C}\mathbf{u}_0 \\ \mathbf{C}\mathbf{A}\mathbf{u}[0] \\ \mathbf{C}\mathbf{A}^2\mathbf{u}[0] \\ \dots \\ \mathbf{C}\mathbf{A}^{n-1}\mathbf{u}[0] \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{C} \\ \mathbf{C}\mathbf{A} \\ \mathbf{C}\mathbf{A}^2 \\ \dots \\ \mathbf{C}\mathbf{A}^{n-1} \end{pmatrix} \mathbf{u}[0].$$

Условием наблюдаемости является требование $\text{rank}(\mathbf{C}'\mathbf{C}'\mathbf{A}'\mathbf{C}'(\mathbf{A}^2)'\dots\mathbf{C}'(\mathbf{A}^{n-1})') = n$, что соответствует следующей теореме.

Теорема 2. Критерий полной наблюдаемости (Р. Калман). Для того чтобы система (1) была полностью наблюдаемой необходимо и достаточно, чтобы матрица наблюдаемости

$$\mathbf{W}_C' = (\mathbf{C}'\mathbf{C}'\mathbf{A}'\mathbf{C}'(\mathbf{A}^2)'\dots\mathbf{C}'(\mathbf{A}^{n-1})')$$

размерности $n \times np$, имела ранг равный n .

Идентифицируемость линейной динамической системы

В задачах идентификации оптических систем на первое место выходит понятие идентифицируемости системы. Рассмотрим некоторые имеющиеся подходы к пониманию данной проблемы в форме последовательно доказываемых утверждений.

Допустим, имеется однородная ЛДС, описываемая следующим уравнениями в пространстве состояний в дискретном времени

$$\begin{cases} \mathbf{u}[k+1] = \mathbf{A}\mathbf{u}[k], \\ \mathbf{y}[k] = \mathbf{E}\mathbf{u}[k], \\ \mathbf{u}[0] = \mathbf{u}_0. \end{cases} \quad (2)$$

Под идентифицируемостью системы в данном случае будем понимать возможность однозначного определения матрицы \mathbf{A} и ненулевого вектора начальных условий \mathbf{u}_0 по набору $\mathbf{y}[k]$ в условиях отсутствия помех.

Теорема 3. ЛДС вида (2) идентифицируема тогда и только тогда, когда $n \times n$ матрица

$$\mathbf{W}_0 = \begin{pmatrix} \mathbf{u}_0 & \mathbf{A}\mathbf{u}_0 & \dots & \mathbf{A}^{(n-1)}\mathbf{u}_0 \end{pmatrix},$$

имеет полный ранг.

Доказательство.

Пусть для идентификации доступны данные:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}[0] &= \mathbf{u}_0 \\ \mathbf{u}[1] &= \mathbf{A}\mathbf{u}[0], \\ \mathbf{u}[2] &= \mathbf{A}\mathbf{u}[1] = \mathbf{A}^2\mathbf{u}[0], \\ &\dots \\ \mathbf{u}[n] &= \mathbf{A}\mathbf{u}[n-1] = \mathbf{A}^{n-1}\mathbf{u}[0]. \end{aligned}$$

Вектор начальных условий \mathbf{u}_0 определяется тривиальным образом из первого уравнения, оставшиеся неизвестные элементы матрицы \mathbf{A} определяются с помощью следующей системы уравнений.

$$\begin{pmatrix} \mathbf{u}[1] & \mathbf{u}[2] & \dots & \mathbf{u}[n] \end{pmatrix} = \mathbf{W}_0' \mathbf{A}'.$$

Для существования единственного решения необходимо и достаточно, чтобы $\text{rank}(\mathbf{W}_0) = n$. Теорема доказана.

Допустим, имеется неоднородная ЛДС, описываемая следующим уравнениями в пространстве состояний в дискретном времени

$$\begin{cases} \mathbf{u}[k+1] = \mathbf{A}\mathbf{u}[k] + \mathbf{B}\mathbf{x}[k], \\ \mathbf{y}[k] = \mathbf{E}\mathbf{u}[k], \\ \mathbf{u}[0] = \mathbf{u}_0. \end{cases} \quad (3)$$

Под идентифицируемостью системы в данном случае будем понимать возможность однозначного определения матриц \mathbf{A} , \mathbf{B} и ненулевого вектора начальных условий \mathbf{u}_0 по набору $\mathbf{y}[k]$ при управляемом входе, в условиях отсутствия помех. Другими словами, нам доступна возможность сформировать входные сигналы таким образом, чтобы была возможна идентификация системы. Воспользуемся этим и сформулируем следующую теорему.

Теорема 4. ЛДС вида (3) идентифицируема тогда и только тогда, когда $\text{rank}(\mathbf{W}_0) = n$, а входные управляющие сигналы могут быть нулевыми и образовывать множество линейно независимых векторов вида $\{\mathbf{B}\mathbf{x}[k+1], \mathbf{B}\mathbf{x}[k+2], \dots, \mathbf{B}\mathbf{x}[k+m]\}$.

Доказательство.

Допустим, для идентификации доступны данные:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}[0] &= \mathbf{u}_0 \\ \mathbf{u}[1] &= \mathbf{A}\mathbf{u}[0] + \mathbf{B}\mathbf{x}[0], \\ \mathbf{u}[2] &= \mathbf{A}\mathbf{u}[1] + \mathbf{B}\mathbf{x}[1] = \\ &= \mathbf{A}^2\mathbf{u}[0] + \mathbf{A}\mathbf{B}\mathbf{x}[0] + \mathbf{B}\mathbf{x}[1], \\ &\dots \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{u}[n+m] &= \mathbf{A}\mathbf{u}[n+m-1] + \mathbf{B}\mathbf{x}[n+m-1] = \\ &= \mathbf{A}^{n+m}\mathbf{u}[0] + \mathbf{A}^{n+m}\mathbf{B}\mathbf{x}[0] + \dots + \mathbf{B}\mathbf{x}[n+m-1]. \end{aligned}$$

Вектор начальных условий \mathbf{u}_0 определяется тривиальным образом из первого уравнения, оставшиеся неизвестные элементы матриц \mathbf{A} и \mathbf{B} определяются с помощью следующей системы $(n+m)n$ линейных уравнений

$$\begin{aligned} &\begin{pmatrix} \mathbf{u}[1] & \mathbf{u}[2] & \dots & \mathbf{u}[n+m] \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} \mathbf{u}'[0] & \mathbf{x}'[0] \\ \mathbf{u}'[1] & \mathbf{x}'[1] \\ \vdots & \vdots \\ \mathbf{u}'[n+m-1] & \mathbf{x}'[n+m-1] \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{A}' \\ \mathbf{B}' \end{pmatrix}. \quad (5) \end{aligned}$$

Представим матрицу системы уравнений (5) в виде блочной матрицы

$$\mathbf{Q} = \begin{pmatrix} \mathbf{U}_1 & \mathbf{X}_1 \\ \mathbf{U}_2 & \mathbf{X}_2 \end{pmatrix},$$

где \mathbf{U}_1 и \mathbf{X}_2 – квадратные матрицы размером $n \times n$ и $m \times m$ соответственно, при этом

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_1 &= \begin{pmatrix} \mathbf{u}'[0] \\ \mathbf{u}'[1] \\ \vdots \\ \mathbf{u}'[n-1] \end{pmatrix}, \quad \mathbf{U}_2 = \begin{pmatrix} \mathbf{u}'[n] \\ \mathbf{u}'[n+1] \\ \vdots \\ \mathbf{u}'[n+m-1] \end{pmatrix}, \\ \mathbf{X}_1 &= \begin{pmatrix} \mathbf{x}'[0] \\ \mathbf{x}'[1] \\ \vdots \\ \mathbf{x}'[n-1] \end{pmatrix}, \quad \mathbf{X}_2 = \begin{pmatrix} \mathbf{x}'[n] \\ \mathbf{x}'[n+1] \\ \vdots \\ \mathbf{x}'[n+m-1] \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

В соответствии с определением идентифицируемости, положим, что в процессе идентификации первые n входных отсчетов нулевые, а оставшиеся таковы, что $\det(\mathbf{X}_2) \neq 0$. Тогда для идентифицируемости системы необходимо и достаточно, чтобы $\text{rank}(\mathbf{U}_1) = n$, $\text{rank}(\mathbf{X}_2) = m$. Таким образом $\text{rank}(\mathbf{Q}) = n + m$.

Легко проверить, что при таком входном сигнале $\mathbf{U}_1 = \mathbf{W}_0$, а из условия $\text{rank}(\mathbf{X}_1) = m$ следует, что вектора $\{\mathbf{B}\mathbf{x}[n], \mathbf{B}\mathbf{x}[n+1], \dots, \mathbf{B}\mathbf{x}[n+m-1]\}$ – линейно независимы. Теорема доказана.

Допустим, имеется неоднородная ЛДС, описываемая следующим уравнениями в пространстве состояний в дискретном времени

$$\begin{cases} \mathbf{u}[k+1] = \mathbf{A}\mathbf{u}[k] + \mathbf{B}\mathbf{x}[k], \\ \mathbf{y}[k] = \mathbf{C}\mathbf{u}[k], \\ \mathbf{u}[0] = \mathbf{u}_0. \end{cases} \quad (6)$$

Под идентифицируемостью системы в данном случае будем понимать возможность определения матриц \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} и, в том числе, нулевого вектора

начальных условий по набору $\mathbf{y}[k]$ при управляемом входе, в условиях отсутствия помех.

Теорема 5. ЛДС вида (6) идентифицируема тогда и только тогда, когда:

1. ЛДС полностью наблюдаема и управляема.
2. $\text{rank}(\mathbf{W}_0) = n$.
3. Входные управляющие сигналы могут быть нулевыми и/или образовывать множество линейно независимых векторов.

Доказательство данной теоремы кажется вполне очевидным, если учесть имеющуюся свободу в выборе ансамбля входных сигналов, а также доказательство критерия наблюдаемости и предыдущую теорему.

Из условия наблюдаемости следует, что существует однозначное соответствие между наблюдаемыми данными и вектором состояний в любой момент времени.

Из условия управляемости следует возможность создать любые начальные условия на входе однородной модели, в том числе такие, чтобы стала возможна идентификация однородной модели системы.

Из 3-го требования теоремы следует возможность идентификации матрицы \mathbf{B} , при известных \mathbf{A} и \mathbf{C} .

Доказательство.

Допустим, начальные условия ЛДС ненулевые, а входные сигналы равны нулю. Тогда на выходе однородной ЛДС наблюдаются сигналы

$$\begin{aligned} \mathbf{y}[0] &= \mathbf{C}\mathbf{u}_0 \\ \mathbf{y}[1] &= \mathbf{C}\mathbf{A}\mathbf{u}[0], \\ &\dots \\ \mathbf{y}[n] &= \mathbf{C}\mathbf{A}^n\mathbf{u}[0]. \end{aligned}$$

Сформируем для каждого j -го выхода вектор $\mathbf{y}_j[0]$, такой, что

$$\mathbf{y}_j[0] = \begin{pmatrix} \mathbf{C} \\ \mathbf{C}\mathbf{A} \\ \mathbf{C}\mathbf{A}^2 \\ \dots \\ \mathbf{C}\mathbf{A}^{n-1} \end{pmatrix}_j \cdot \mathbf{u}[0] = \mathbf{W}_c[j]\mathbf{u}[0].$$

В соответствии с критерием наблюдаемости $\mathbf{W}_c[j]$ имеет полный ранг и соответственно имеет обратную матрицу $\mathbf{W}_c^{-1}[j]$. Тогда для любого j

$$\mathbf{y}_j[0] = \begin{pmatrix} \mathbf{C} \\ \mathbf{C}\mathbf{A} \\ \mathbf{C}\mathbf{A}^2 \\ \dots \\ \mathbf{C}\mathbf{A}^{n-1} \end{pmatrix}_j \cdot \mathbf{u}[0] = \mathbf{W}_c[j]\mathbf{u}[0],$$

$$\begin{aligned} \mathbf{y}_j[1] &= \\ &= \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ & & & \dots & \\ -a_n^j & -a_{n-1}^j & -a_{n-2}^j & \dots & -a_1^j \end{pmatrix} \mathbf{y}_j[0] = \\ &= \mathbf{A}_{St}^j \mathbf{y}_j[0] \end{aligned}$$

Продолжая последовательность $\mathbf{y}_j[k]$, получим стандартную управляемую модель в пространстве состояний для j -го выхода однородной системы, у которой $\mathbf{C}_{St}^j = (1 \ 0 \ \dots \ 0)$.

Параметры \mathbf{A}_{St}^j легко восстановить из последовательности $\mathbf{y}_j[k]$, записав соответствующие линейные уравнения.

Далее, создавая на каждом i -м входе последовательность $\mathbf{B}_i x_i[k], \mathbf{B}_i x_i[k+1], \dots, \mathbf{B}_i x_i[k+n-1]$ в соответствии с 3-м условием теоремы, получим оценку

$$\mathbf{B}_{St}^{i,j} = \mathbf{W}_c[j]\mathbf{B}_i = \begin{pmatrix} b_1^{i,j} \\ b_2^{i,j} \\ b_3^{i,j} \\ \vdots \\ b_n^{i,j} \end{pmatrix}.$$

Таким образом, идентифицируем строчную форму стандартной наблюдаемой модели для каждого j -го выхода и i -го входа.

$$\begin{cases} \mathbf{y}_j[k+1] = \mathbf{A}_{St}^j \mathbf{y}_j[k] + \mathbf{B}_{St}^{i,j} x_i[k], \\ \mathbf{z}_j[k] = \mathbf{C}_{St}^j \mathbf{y}_j[k] \\ \mathbf{y}_j[0]. \end{cases}$$

Запишем передаточную функцию для каждого j -го выхода и i -го входа

$$w_{i,j}(z) = \frac{d_1^{i,j} z^{-1} + \dots + d_{n-1}^{i,j} z^{-n+1} + d_n^{i,j} z^{-n}}{1 + a_1^j z^{-1} + \dots + a_{n-1}^j z^{-n+1} + a_n^j z^{-n}}.$$

Таким образом, если выполняются условия теоремы, то система идентифицируема, т.е. существует единственная передаточная функция ММО системы $\mathbf{W}(z)$, заданная матрицей дробно-рациональных функций $w_{i,j}(z)$, которую можно оценить, задавая различные сигналы на входе идентифицируемой системы.

Допустим, начальные условия ЛДС нулевые, тогда условие управляемости дает возможность задать начальные условия однородной системы, так, чтобы выполнилось требование к идентифицируемости однородной системы.

Теорема доказана.

Теперь, если это необходимо, можно построить матрицы $\mathbf{A}, \mathbf{C}, \mathbf{B}$ ЛДС. Однако, выбор ма-

три модели системы вида (4) в пространстве состояний неоднозначен, даже в случае полностью идентифицируемой системы существует много способов построения моделей данного типа, неразличимых по входу и выходу, в том числе содержащих минимальное число параметров.

Слепая идентифицируемость линейной динамической системы

Под слепой идентифицируемостью системы в данном случае будем понимать возможность определения матриц \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} в (6) и в том числе нулевого вектора начальных условий \mathbf{u}_0 по набору $\mathbf{y}[k]$ при неизвестной входной последовательности конечной длины, в условиях отсутствия помех.

Теорема 7. SIMO ЛДС вида (6) идентифицируема вслепую тогда и только тогда, когда:

1. ЛДС идентифицируема в обычном смысле.
2. Передаточная матрица системы

$$\mathbf{W}(z) = \begin{pmatrix} \frac{P_1(z)}{Q_1(z)} & \dots & \frac{P_M(z)}{Q_M(z)} \end{pmatrix}^t$$

такова, что многочлены $P_i(z)Q_j(z)$ и $P_j(z)Q_i(z)$ не имеют общих корней при $i \neq j$, M – число каналов.

Доказательство.

Допустим, MIMO ЛДС в дискретном времени задана в пространстве состояний системой уравнений

$$\begin{cases} \mathbf{u}[k+1] = \mathbf{A}\mathbf{u}[k] + \mathbf{B}\mathbf{x}[k], \\ \mathbf{y}[k] = \mathbf{C}\mathbf{u}[k], \\ \mathbf{u}[0] = 0. \end{cases}$$

Применяя z-преобразование, получим

$$\begin{aligned} z\mathbf{U}(z) &= \mathbf{A}\mathbf{U}(z) + \mathbf{B}\mathbf{X}(z), \\ \mathbf{Y}(z) &= \mathbf{C}\mathbf{U}(z). \end{aligned}$$

Затем

$$\begin{aligned} \mathbf{U}(z) &= (z\mathbf{E} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{B}\mathbf{X}(z), \\ \mathbf{Y}(z) &= \mathbf{C}\mathbf{U}(z). \end{aligned}$$

Таким образом, получим матрицу передаточных функций (передаточную матрицу) системы в виде

$$\mathbf{W}(z) = \mathbf{C}(z\mathbf{E} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{B}.$$

Если система идентифицируема в обычном смысле, то существует единственная передаточная функция MIMO системы $\mathbf{W}(z)$, заданная матрицей дробно-рациональных функций $w_{i,j}(z)$, или в случае SIMO, вектором

$$\mathbf{W}(z) = \begin{pmatrix} \frac{P_1(z)}{Q_1(z)} & \dots & \frac{P_M(z)}{Q_M(z)} \end{pmatrix}^t.$$

Если система полностью наблюдаема и управляема, то передаточная матрица полностью описывает систему в терминах вход-выход.

Для любого i -го и j -го выхода можно записать

$$\frac{y_i(z)}{y_j(z)} = \frac{P_i(z)Q_j(z)}{Q_i(z)P_j(z)}.$$

Тогда, при соблюдении 2-го условия выходные сигналы полностью описывают передаточную матрицу системы.

Заключение

Таким образом, если система идентифицируема, то для ее описания достаточно использовать модель «вход-выход», при этом модель «вход-состояние-выход» является избыточной. Для слепой идентифицируемости линейной динамической системы, по крайней мере для случая дискретной системы с одним входом и множественным выходом, необходимо и достаточно выполнение двух условий: идентифицируемости системы в обычном смысле и отсутствие общих нулей полиномиальных компонентов передаточной матрицы системы.

Литература

1. Горячкин О.В. Методы слепой обработки сигналов и их приложения в системах радиотехники и связи. М.: Радио и связь, 2003, 230 с.
2. Горячкин О.В., Эрина Е.И. Слепая идентификация информационного канала по многообразиям заданной корреляции, порожденным случайными полиномами // Успехи современной радиоэлектроники. 2008. № 8. С. 70–77.
3. Мирошник И.В., Никифоров В.О., Фрадков А.Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. СПб.: Наука, 2000. 549 с.
4. Горячкин О.В., Шатских С.Я. Идентификация и диагностика систем (приложения к задачам обработки сигналов и изображений): учебное пособие. Самара: ПГУТИ, 2018. 191 с.
5. Goryachkin O.V. Review of V. A. Soifer's work in the field of statistical communication theory // Proceedings of ITNT 2020: 6th IEEE International Conference on Information Technology and Nanotechnology. Samara, 2020. P.9253213. DOI 10.1109/ITNT49337.2020.9253213
6. Балонин Н.А. Теоремы идентифицируемости. СПб.: Политехника, 2010. 48 с.
7. Yakimenka A.A. On the question of identification of simultaneous equations models // Proceedings of BSTU. Physics and Mathematics. Informatics. 2022. no. 2(260). P. 10–13.

8. Прокис Дж. Цифровая связь / пер с англ.; под ред. Д.Д. Кловского. М.: Радио и связь, 2000. 800 с.
9. Abed-Meraim K., Hua W. Qiu Y. Blind System Identification // Proceeding of the IEEE. 1997. Vol.85. P.1308–1322.
10. Via J., Santamaria I., Perez J. A Sufficient Condition for Blind Identifiability of MIMO-OST-BC Channels Based on Second Order Statistics // IEEE 7th Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications. Cannes, 2006. P.1–5.
11. Gustafson F., Wahlberg B. Blind equalization by direct examination of the input sequences // IEEE Transactions on Communications. 1995. Vol. 43, no. 7. P. 2213–2222.

Получено 08.06.2023

Горячкин Олег Валериевич, д.т.н., профессор, проректор по научной работе Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики. 443010, Российская Федерация, г. Самара, ул. Л. Толстого, 23. Тел. +7 846 332-21-61. E-mail: o.goryachkin@psuti.ru

BLIND IDENTIFIABILITY OF A LINEAR DYNAMIC COMMUNICATION CHANNEL MODEL

Goryachkin O.V.

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

The article describes the problem of developing a mathematical model of data transmission channel in communication systems in the case when signals at the channel input channel are unknown at the channel output. Development of mathematical models directly from observed data constitutes an identification problem, and the case under consideration belongs to the blind identification problem. The work consistently examines the concept of linear dynamic system identifiability in state space and shows the connection of this concept with the observability and controllability concepts. A number of statements about identifiability of a linear dynamic system describing communication channel are proved. In particular, it is shown that if the system is identifiable, it is sufficient to use the input-output model for its description, while the input-state-output model is redundant. Further, based on the proven statements, blind identifiability conditions are formulated for the case of a discrete system with one input and multiple outputs, which are imposed on the components of the system's transfer matrix.

Keywords: *communication channel, linear dynamic model, identifiability of dynamic model*

DOI: 10.18469/ikt.2023.21.1.03

Goryachkin Oleg Valerievich, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 23, L. Tolstoy Street, Samara, 443010, Russian Federation; Vice-Rector for Scientific Work, Doctor of Technical Sciences, Professor. Tel. +7 846 332-21-61. E-mail: o.goryachkin@psuti.ru

References

1. Goryachkin O.V. *Methods of blind signal processing and their applications in radio engineering and communication systems*. Moscow: Radio i svyaz', 2003, 230 p. (In Russ.)
2. Goryachkin O.V., Erina E.I. Blind channel identification by manifolds of given correlation generated by random holynoms. *Uspekhi sovremennoj radio-elektroniki*, 2008, no. 8, pp. 70–77. (In Russ.)
3. Miroshnik I.V., Nikiforov V.O., Fradkov A.L. *Nonlinear and adaptive control of complex dynamic systems*. Saint Petersburg: Nauka, 2000, 549 p. (In Russ.)
4. Goryachkin O.V., SHatskih S.Ya. *Identification and diagnostics of systems (applications to the tasks of signal and image processing): Textbook*. Samara: PSUTI, 2018, 191 p. (In Russ.)
5. Goryachkin O.V. Review of V. A. Soifer's work in the field of statistical communication theory. *Proceedings of ITNT 2020: 6th IEEE International Conference on Information Technology and Nanotechnology*. Samara, 2020, pp. 9253213. DOI 10.1109/ITNT49337.2020.9253213

6. Balonin N.A. *Identifiability theorems*. Saint Petersburg: Politekhnika, 2010, 48 p. (In Russ.)
7. Yakimenka A.A. On the question of identification of simultaneous equations models. *Proceedings of BSTU. Physics and Mathematics. Informatics*, 2022, no. 2 (260), pp. 10–13.
8. Prokis Dzh. *Digital communication*. Trans. From English. Ed by D.D. Klovskogo. Moscow: Radio i svyaz', 2000, 800 p. (In Russ.)
9. Abed-Meraim K., Hua W. Qiu Y. Blind System Identification. *Proceeding of the IEEE*, 1997, vol. 85, pp. 1308–1322.
10. Via J., Santamaria I., Perez J. A Sufficient Condition for Blind Identifiability of MIMO-OSTBC Channels Based on Second Order Statistics. *IEEE 7th Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications*. Cannes, 2006, pp.1–5.
11. Gustafson F., Wahlberg B. Blind equalization by direct examination of the input sequences. *IEEE Transactions on Communications*, 1995, vol. 43, no. 7, pp. 2213–2222.

Received 08.06.2023

СЕТИ СВЯЗИ И МУЛЬТИСЕРВИСНЫЕ УСЛУГИ

УДК 621.394.74

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МАКЕТА СЕТИ VAN ДЛЯ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ЗДОРОВЬЯ ЧЕЛОВЕКА

Глушак Е.В.¹, Сенгилевцев О.А.²

¹Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ

²Самарский государственный медицинский университет, Самара, РФ

E-mail: evglushak@yandex.ru

В статье описывается разработка реального макета сети VAN (Body Area Network) для мониторинга за состоянием здоровья человека. Сети VAN могут помочь улучшить качество жизни людей, страдающих от различных заболеваний, таких как диабет, сердечно-сосудистые заболевания и другие. Они являются доступными для широкого круга пользователей, включая людей с ограниченными возможностями и пожилых людей. Также могут обеспечить высокий уровень безопасности, так как они используют шифрование данных и аутентификацию пользователей. Данные сети легко настраиваются и адаптируются под нужды конкретного пользователя. В статье представлены результаты проведенных исследований, которые показывают состояние человека при различных условиях. Благодаря разработанному макету сети VAN, можно не только на практике исследовать состояние здоровья людей, но и использовать его для научных исследований в университетах.

Ключевые слова: сети VAN, датчик электрокардиограммы, датчик температуры, датчик пульса, радиомодули, беспроводная передача, сенсоры, акселерометр

Введение

Сеть VAN (Body Area Network) – это беспроводная сеть, которая состоит из прилагаемых к телу устройств, передающих данные на другие электронные устройства. Данная технология, в отличие от других сопутствующих технологий, позволяет значительно снизить степень излучения, мощность и энергопотребление устройств. Система представляет собой определенное количество датчиков, подсоединяемых к телу.

Датчик – это компонент, который измеряет или контролирует определенные параметры, такие как температура, давление, влажность, уровень звука или другие физические величины, и преобразует эти данные в электрический сигнал для дальнейшей обработки в системе. Этот сигнал может быть обработан и использован для

управления системой или для получения информации о состоянии объекта. Датчики могут быть использованы в различных областях, включая промышленность, медицину, науку и т. д. [1–3]. Датчики, снимающие показания называются BSU. Передача данных – это перенос информации с одного устройства к другому, которые находятся на определенном расстоянии друг от друга без использования проводного подключения [4].

Также отметим, что в настоящее время в развитии электронного приборостроения в медицине используют два вида обмена информацией о состоянии здоровья человека: проводные каналы связи и беспроводные с передачей электромагнитных сигналов через окружающее свободное пространство. Стоит учесть, что первый способ может доставлять дискомфорт человеку. Второй же способ нацелен на модернизацию и про-

гресс в способах информационного обмена цифровыми данными в портативных устройствах, присоединяемых к телу человека. Данная технология работает при нескольких способах соединения: точка, точка-многоточка. Это позволяет сети быть гибкой и адаптивной, что обеспечивает ее способность справляться с различными сетевыми условиями и нагрузками [5].

На основе вышесказанного можно сделать вывод о высокой актуальности исследования данных сетей.

Разработка макета сети VAN

Для разработки макета сети VAN с целью мониторинга состояния здоровья человека необходимы следующие компоненты:

- датчик температуры на датчике температуры DS18B20;
- датчик электрокардиограммы (ЭКГ) на базе микросхемы AD8232;
- датчик пульса и уровня SpO₂, MAX30102;
- 3-х осевой акселерометр ADXL345;
- радиомодуль nRF24L01;
- цветной графический TFT-экран 480×320;
- mega 2560;
- arduinoNano CH340;
- датчик температуры на датчике температуры DS18B20.

На рисунке 1 показан датчик температуры, работающий на микросхеме DS18B20.



Рисунок 1. Датчик температуры

Датчик температуры может измерять температуру окружающей среды в диапазоне от -55 до +125 градусов Цельсия и передавать данные в виде цифрового сигнала с разрешением 12 бит по протоколу 1-Wire [6]. Благодаря использованию датчиков можно значительно упростить процесс подключения устройств к контроллеру, сократив количество необходимых портов и проводов. Датчики также позволяют использовать

более эффективные методы питания, такие как «паразитное питание», которое позволяет датчикам получать энергию прямо из сигнала, уменьшая количество необходимых кабелей и повышая общую эффективность системы. Каждый датчик может включать в себя 64-битный код, реализуемый микроконтроллером для приема и передачи данных конкретному датчику на общей шине. Каждый датчик имеет свой уникальный код, который может быть использован для идентификации датчика и получения информации от него. После подачи питания на датчик он переходит в режим ожидания, снижая энергопотребление. Для измерения температуры необходимо отправить команду на датчик, чтобы начать процесс измерения. После завершения измерения результат сохраняется в памяти датчика и датчик возвращается в режим низкого энергопотребления. Датчик ЭКГ на базе микросхемы AD8232 показан на рисунке 2.

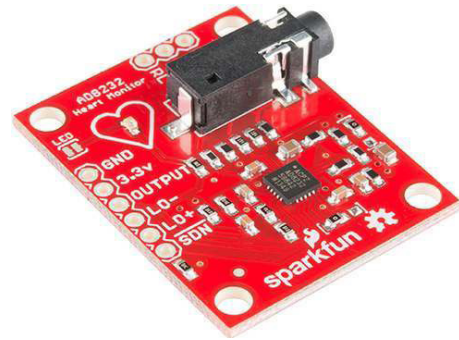


Рисунок 2. Датчик ЭКГ на базе микросхемы AD8232

Модуль ЭКГ AD8232 является одним из недорогих модулей, который предназначен для определения активности и работы сердца. Эта электрическая активность и является электрокардиограммой (ЭКГ) и может быть представлена в виде аналоговых показаний. ЭКГ всегда отличаются наличием шума, поэтому монитор сердечного ритма AD8232 выполняет функции операционного усилителя, для получения чистого сигнала для определения интервалов PR и QT [7].

Датчик ЭКГ на основе микросхемы AD8232 предназначен для получения, усиления и фильтрации сигналов электрической активности сердца. Микросхема содержит фильтры высоких частот и операционный усилитель, что позволяет удалять помехи и шумы из сигнала. Датчик необходимо подключить к осциллографу. Electroды на теле пациента улавливают изменения потенциалов, вызванные деполяризацией сердечной мышцы. На основе AD8232 могут быть созданы портативные устройства для мониторинга здоровья сердца, такие как ЭКГ и кардиомониторы. Основная схема снятия (рисунок 3) – для запи-

си отведений электроды накладывают на правую руку (RA), левую руку (LA) и левую ногу (RL).

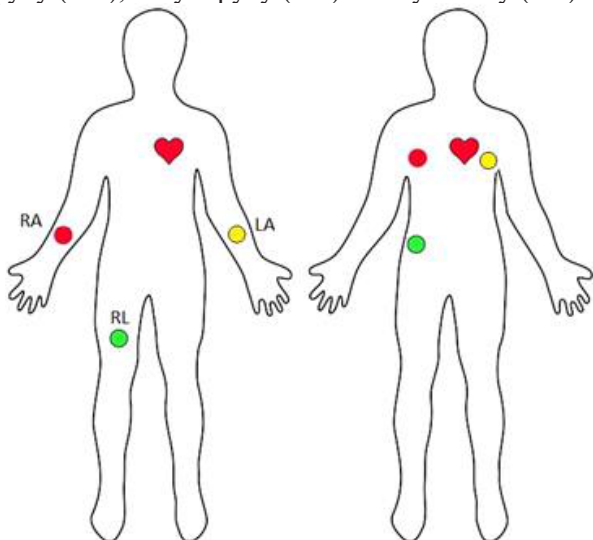


Рисунок 3. Основная схема снятия

Данные с датчика обработали в модуле biosppy для проверки полученных данных. Модуль biosppy – это программный модуль, написанный на языке Python, который обрабатывает входные данные. Эти данные могут быть в виде массива информации, который затем анализируется и обрабатывается модулем.

На рисунке 4 показаны чистые данные с человека. На первом графике (рисунок 4а) показано неотфильтрованный сигнал, полученный с датчика. На втором (рисунок 4б) – отфильтрованный сигнал. На третьем (рисунок 4в) показан пульс. Четвертый график (рисунок 4г) показывает импульс сокращения сердца.

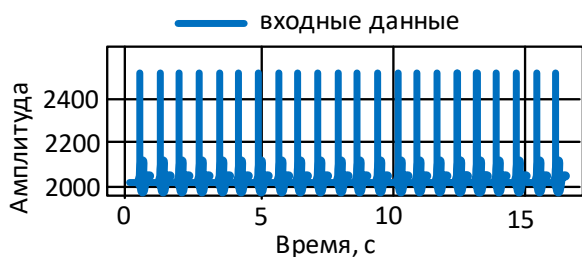


Рисунок 4а. Неотфильтрованный сигнал

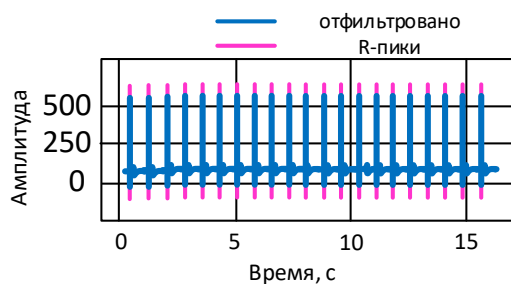


Рисунок 4б. Отфильтрованный сигнал

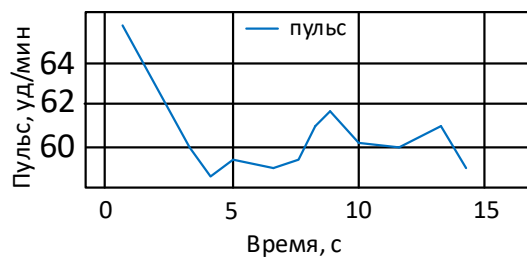


Рисунок 4в. Пульс

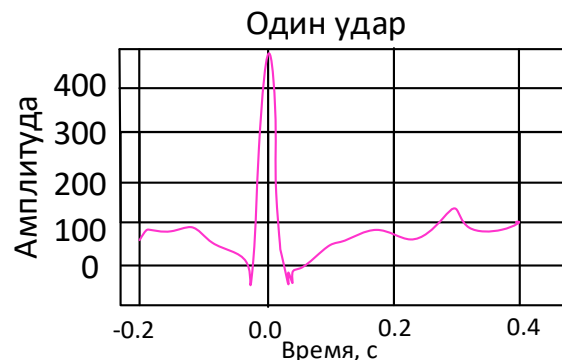


Рисунок 4г. Импульс сокращения сердца

Для создания макета будем использовать сенсорный модуль MAX30102, предназначенный для реализации различных медицинских устройств, которые контролируют сердечные ритмы, а также процент наличия кислорода в крови человека. Сенсорный модуль MAX30102 состоит из светодиодов, оптических элементов и фотоприемника. Электронная схема обработки сигналов используется благодаря наличию низкого внутреннего шума и может уменьшить или полностью ликвидировать засветку. Во время измерения данных используются каналы красного и инфракрасного света с интенсивностью и продолжительностью измерения, которые могут быть настроены с помощью программного обеспечения. MAX30102 (рисунок 5) работает от источника питания напряжением 1,8 В.

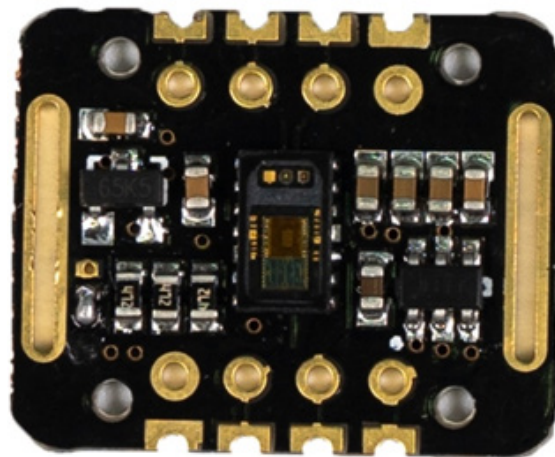


Рисунок 5. Сенсорный модуль MAX30102

Отдельный источник питания 5,0 В требуется для излучения встроенных светодиодов. Работа с какими-либо внешними устройствами осуществляется с помощью интерфейса I2C. Модуль MAX30102 может находиться в режиме ожидания и практически не потреблять ток, благодаря чему можно не использовать питание.

SpO_2 – это обозначение процента кислорода, который содержится в крови. Определяется данный процент как отношение насыщенного кислородом гемоглобина (HbO_2) в процентах к общему содержанию гемоглобина ($HbO_2 + RHb$), определяемых с помощью фотодетектора, ИК и красного светодиода MAX30102 [8]:

$$SpO_2 = 100 \cdot \frac{C[HbO_2]}{C[HbO_2] + C[RHb]}$$

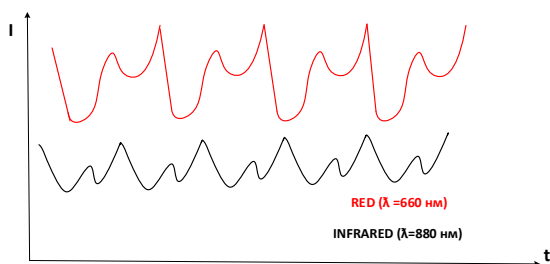


Рисунок 6. Содержание кислорода в крови

В систему SpO_2 входит схема компенсации внешней засветки (КВЗ), сигма-дельта-АЦП (аналого-цифровой преобразователь) и запатентованный цифровой фильтр используются для измерения сигналов. КВЗ (коэффициент внешней засветки) может быть использован для устранения помех и расширения динамического диапазона измерений. АЦП может быть запрограммирован на работу в диапазоне от 2 до 16 микроампер. КВЗ позволяет устранить помехи от сигналов внешней засветки до 200 микроампер. Внутренний АЦП производит непрерывное дискретное преобразование с разрешением 18 бит. Частота дискретизации датчика пульса может варьироваться от 50 до 3200 выборок в секунду. Датчик пульса оснащен монитором сердечных сокращений и оксиметрическим биосенсором со встроенными светодиодами. Он также имеет интегрированную оптическую систему, которая обеспечивает надежность измерений [8]. Датчик обладает сверхнизким энергопотреблением, подходящим для мобильных устройств. Программируемая периодичность измерения и режим энергосбережения позволяют оптимизировать энергопотребление. Электронная схема датчика потребляет менее 1 мВт, а в выключенном состоянии его потребление электрического тока составляет около 0,7 мкА. Датчик способен быстро

выводить данные, устойчив к вибрациям и обладает высоким соотношением сигнала к шуму. Он работает в диапазоне температур от -40 до 85 градусов Цельсия. Также рассмотрим 3-х осевой акселерометр ADXL34, входящий в состав нашего макета (рисунок 7).

Имеется возможность проводить измерения статического ускорения, которое вызвано гравитацией, а в части определения отклонения, может измерять даже динамическое ускорение, которое, в свою очередь, получено вследствие движения или ударов.

Блок определения активности и неактивности может свидетельствовать о движении или продолжительном состоянии покоя, а также идентифицировать превышение ускорения по любой из осей заранее заданного уровня. Детектор касаний может определять однократные и двойные касания. Датчик свободного падения определяет, находится ли устройство в свободном падении или нет. Данные от этих блоков могут быть выведены на два разных вывода прерываний. Как уже рассматривалось выше, в микросхему ADXL345, которая выполняет функцию определения скорости, входят следующие блоки [9]:

1. Блок определения активности и неактивности может свидетельствовать о движении или продолжительном состоянии покоя, а также идентифицировать превышение ускорения по любой из осей заранее заданного уровня.
2. Сенсорный детектор обнаруживает нажатия и свайпы в любом направлении.
3. Датчик падения фиксирует момент, когда устройство начинает падать.



Рисунок 7. Внешний вид акселерометра ADXL34

На рисунке 8 показан сигнал с датчика оси, который возникнет в результате падения человека

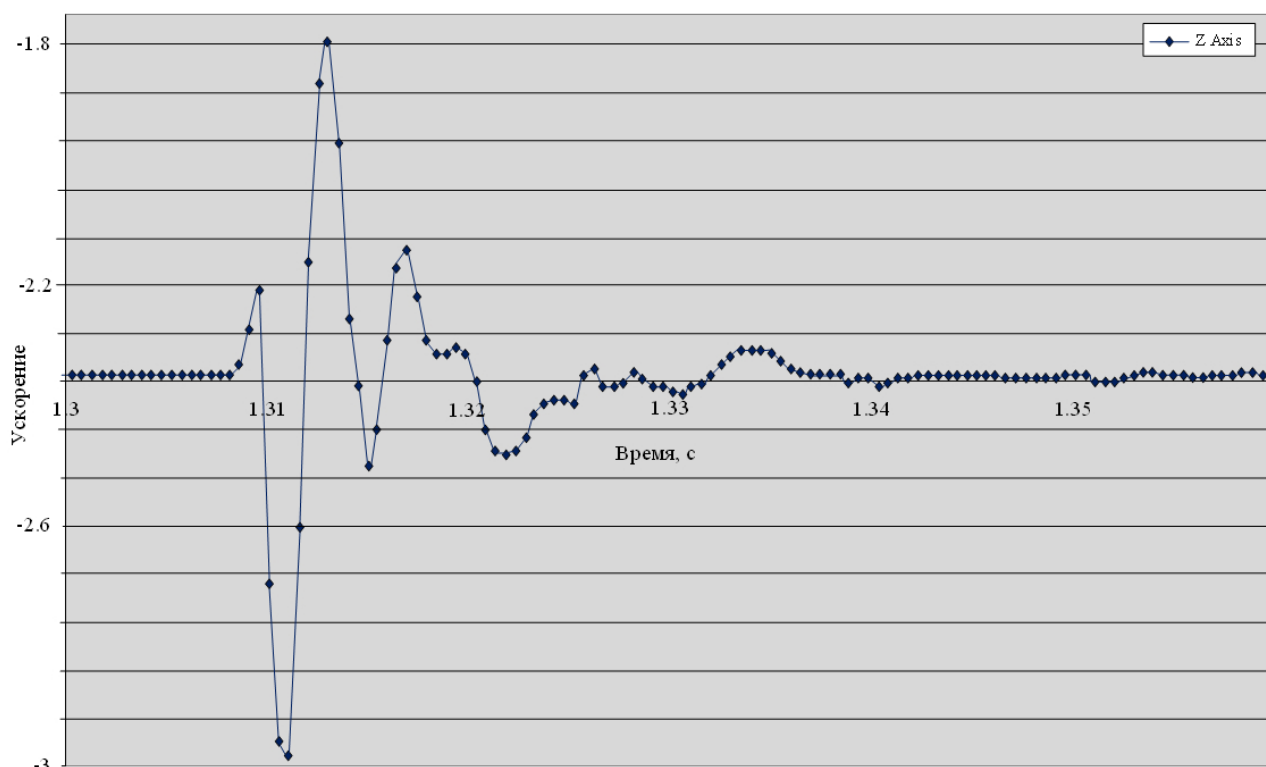


Рисунок 8. Высокочастотный всплеск сигнала при легком ударе по оси Z

в пространстве. Данная информация может показать потерю сознания человека при его перемещении в помещении.

Радиомодуль nRF24L01, входящий в состав разработанного макета показан на рисунке 9. Он работает на частоте 2,4 ГГц, имеет напряжение от 3,3 до 3,6 В и обеспечивает дальность связи до 100 метров на открытом пространстве и до 30 метров в помещении [10].

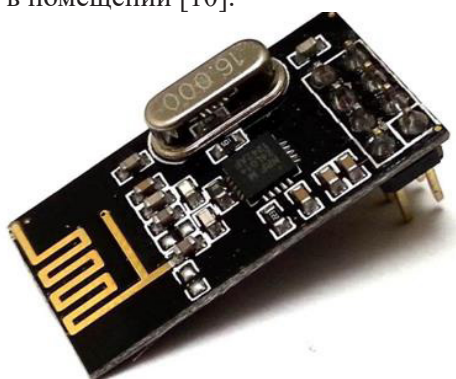


Рисунок 9. Радиомодуль nRF24L01

Цветной графический TFT-экран 480×320 показан на рисунке 10.

Рабочее напряжение: 3,3-5 В. Разрешение 480×320 (RGB). На рисунке 11 показан микроконтроллер ATmega2560, который преобразовывает полученную информацию с радиомодуля в графический вид.

Рабочее напряжение модуля составляет 5 В. Рекомендуемое входное напряжение находится в диа-

пазоне от 7 до 12 В. На рис. 12 показана используемая для макета плата ArduinoNano CH340 [11].



Рисунок 10. Цветной графический TFT-экран



Рисунок 11. Микроконтроллер ATmega2560

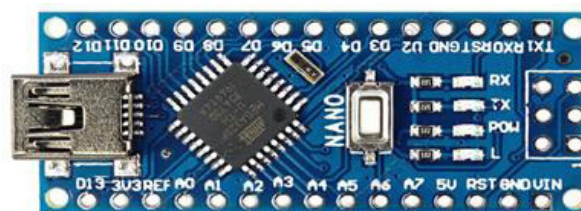


Рисунок 12. Плата ArduinoNano CH340

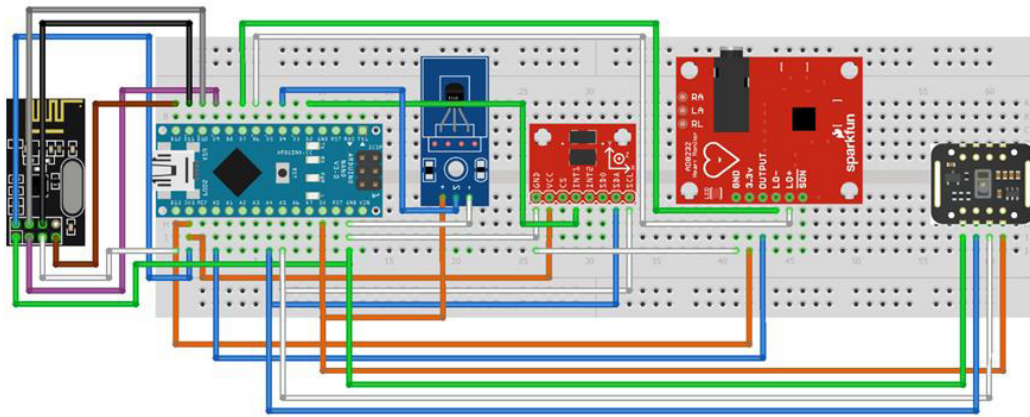


Рисунок 13. Макетная плата

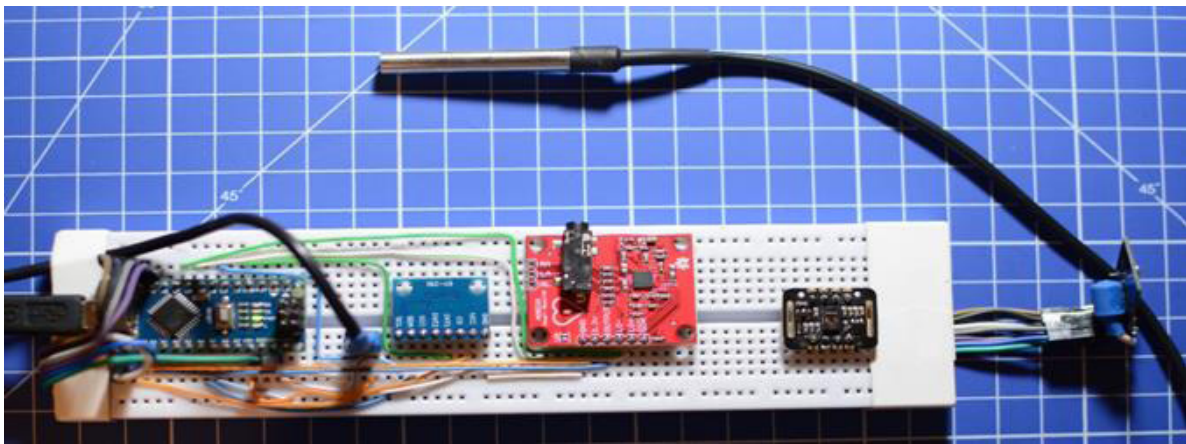


Рисунок 14. Собранный макет передатчика

Результаты проведенных экспериментов

Далее согласно приведенным ниже схемам проводим сборку на макетной плате (рисунок 13).

На данной схеме показан макет соединения датчиков с контроллером ArduinoNano. На рисунке 14 приведена фотография собранного макета. Полученный макет работает от напряжения 5В, получаемого от microUSB, благодаря чему его можно запитать от любого портативного аккумуляторного зарядного устройства для зарядки обычных смартфонов.

Загружаем необходимые библиотеки в ArduinoNano, далее прописываем переменные среды для работы. Сигналы, считываемые с датчиков кислорода, температуры, акселерометра (играет роль датчика падения человека), распределяя по группам, передаем по радио модуля на 2 плату Arduino ATmega2560.

В Arduino ATmega2560 так же собираем необходимые библиотеки, а также разбираем полученный сигнал и выводим показания на монитор, показаниями задаем критические параметры (температуру 35-38, кислород 80-100, аксиометр ставим на срабатывание при ускорении перемещения

в осях – падение человека) при которых на дисплее будет отображаться тревога (рисунок 15).

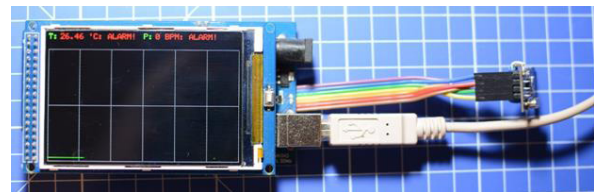


Рисунок 15. Приемник

Разработанная логика функционирования передатчика представлена в виде алгоритма (рисунок 16). Данный алгоритм показывает логику работы передатчика от инициализации программы, циклического опроса датчиков до передачи полученных данных в радиоканал. На рисунке 17 показана логика работы приемника.

Благодаря разработанным алгоритмам реализованный макет для мониторинга состояния здоровья человека сможет показать сбой в работе сердца с помощью датчика ЭКГ, а также определить процент содержания кислорода в крови и температуру тела, что в данный момент является актуальным в связи с COVID-19 и распространением других заболеваний.

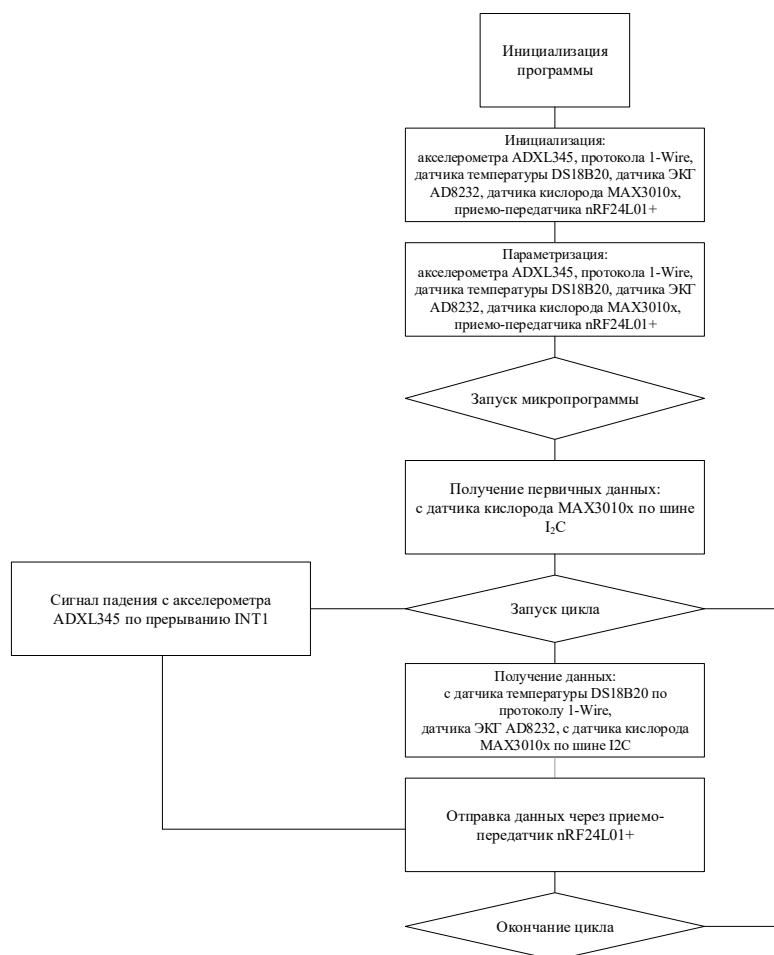


Рисунок 16. Логика работы передатчика

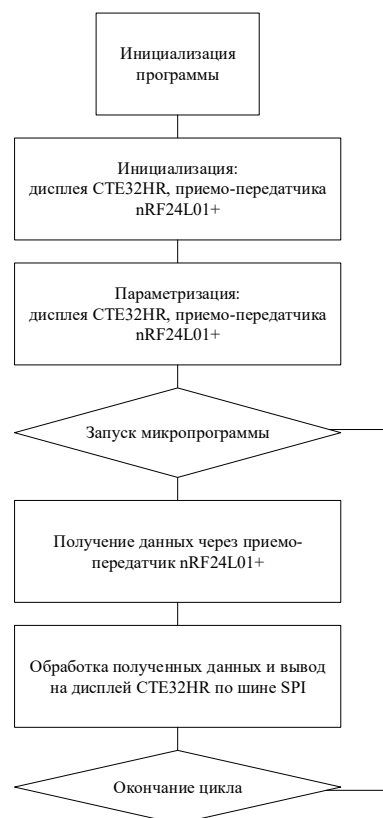


Рисунок 17. Логика работы приемника

Заключение

Разработанное устройство гораздо дешевле зарубежных аналогов. Данное устройство позволяет следить за состоянием здоровья пожилых людей или людей с ограниченными возможностями. Также данный макет можно применять для проведения лабораторных работ при обучении студентов в ВУЗах.

Дальнейшая разработка будет заключаться в уменьшении размеров модели, в установке более точных датчиков, планируется заменить радио модуль на GSM или Wi-Fi для передачи на более дальние расстояния.

Также дальнейшая работа будет заключаться в написании мобильного приложения для мониторинга (доступного для операционных систем iOS, Android и РЕД ОС), возможности разработки и подключения дополнительных датчиков (датчика контроля за капельницей пациента, датчика дыхания), а также планируется установка модуля для сбора и хранения данных.

Литература

1. Аль-Наггар Я.М. Исследование методов кластеризации и оценки качества обслуживания в сетях интернета вещей на основе нечеткой логики: дис. ... канд. тех. наук. М., 2016. 165 с.
2. Лобанов В.М. Экспериментальный стенд для исследования возможности использования тела человека в качестве среды передачи цифровых данных // Медицинская техника. 2009. №6. С. 17–21.
3. Павлов К.А. Исследование возможности передачи электрического сигнала через тело человека // Микроэлектроника и информатика: материалы 15-й Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов. М.: МИЭТ, 2008. С. 278.
4. Павлов К.А. Первые шаги к созданию технологии передачи данных через тело человека // Молодежь и современные информационные технологии: материалы VII Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Томск: СПБ Графика, 2009. С. 51–52.
5. Сверхширокополосные беспроводные натель-

- ные сенсорные сети / А.С. Дмитриев [и др.] // Радиотехника и электроника. 2013. Т. 58, № 12. С. 1160–1170.
6. Павлов К.А. Исследование системы передачи данных с использованием тела человека в качестве передающей среды // II Научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов: материалы конференции. М.: НП «ЦРП ЗелАО г. Москвы», 2010. С. 32.
 7. Датчик температуры с интерфейсом 1-Wire. URL: <http://mypractic.ru/ds18b20-datchik-temperature-s-interfejsom-1-wire-opisanie-na-russkom-yazyke.html> (дата обращения: 05.09.2023).
 8. Подключение датчика сердечного ритма. URL: http://www.electronica52.in.ua/proekty-arduino/arduino_ad8232 (дата обращения: 05.09.2023).
 9. Пульсоксиметрия от Maxim: новый датчик MAX30102. URL: <https://www.compel.ru/lib/77838> (дата обращения: 07.09.2023).
 10. Подключения акселерометра ADXL345 к Arduino. URL: <https://robot-kit.ru/article/Accelerometer-Arduino-ADXL345> (дата обращения: 07.09.2023).
 11. Радиомодуль nRF24L01. Обзор. URL: <https://robototehnika.ru/content/article/radiomodul-nrf24l01-chast-1-obzor> (дата обращения: 08.09.2023).
 12. Arduino Nano V3.0 CH340 на ATmega328. URL: <https://compacttool.ru/viewtovar.php?id=482> (дата обращения: 06.09.2023).

Получено 13.09.2023

Глушак Елена Владимировна, к.т.н., доцент кафедры сетей и систем связи Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики. 443010, ул. Льва Толстого, 23. Тел. +7 917 118-65-66. E-mail: evglushak@yandex.ru

Сенгилевцев Олег Андреевич, начальник центра системного администрирования и развития локально-вычислительных сетей Самарского государственного медицинского университета. 443079, г. Самара, ул. Гагарина, 18. Тел. +7 964977-55-83. E-mail: odmin@samsmu.ru

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF THE BAN NETWORK LAYOUT FOR HUMAN HEALTH MONITORING

Glushak E.V.¹, Sengilevtcev O.A.²

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

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

E-mail: evglushak@yandex.ru

This article describes the development of a real BAN (Body Area Network) network layout for human health monitoring. BAN networks can help improve life quality of people suffering from various diseases, such as diabetes, cardiovascular diseases and others. They are accessible to wide range of users, including people with disabilities and the elderly. They can also provide a high level of security, since they use data encryption and user authentication. These networks may be easily configured and adapted to the needs of a particular user. The article presents results of studies that show state of the human health under various conditions. Thanks to the developed BAN network layout, it is possible not only to study the condition of human health in practice, but also to use it for scientific research at universities.

Keywords: *BAN networks, electrocardiogram sensor, temperature sensor, pulse sensor, radio modules, wireless transmission, sensors, accelerometer*

DOI: 10.18469/ikt.2023.21.1.04

Glushak Elena Vladimirovna, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 23, L. Tolstoy Street, Sasmara, 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

Sengilevtcev Oleg Andreevich, Samara State Medical University, 18, Gagarina Street, Samara, 443079, Russian Federation; Head of the Center for System Administration and Development of Local Area Networks. Tel. +7 964 977-55-83. E-mail: odmin@samsmu.ru

References

1. Al-Naggar Ya.M. Research of clustering methods and evaluation of the quality of service in the Internet of Things networks based on fuzzy logic: dis. ... cand. tech. sciences. Moscow, 2016, 165 p. (In Russ.)
2. Lobanov V.M. Experimental setup for studying the possibility of using the human body as a medium for digital data transmission. *Medicinskaya tekhnika*, 2009, no. 6, pp. 17–21. (In Russ.)
3. Pavlov K.A. Investigation of the possibility of transmitting an electrical signal through the human body. *Mikroelektronika i informatika: materialy 15 Vserossijskoj mezhvuzovskoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii studentov i aspirantov*. Moscow: MIET, 2008, pp. 278. (In Russ.)
4. Pavlov K.A. The first steps to the creation of data transmission technology through the human body. *Molodezh' i sovremennye informacionnye tekhnologii: materialy VII Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchenyh*. Tomsk: SPB Grafiks, 2009, pp. 51–52. (In Russ.)
5. Dmitriev A.S. et al. Ultrawideband wireless body-area sensor networks. *Radiotekhnika i elektronika*, 2013, vol. 58, no. 12, pp. 1160–1170. (In Russ.)
6. Pavlov K.A. Research of a data transmission system using the human body as a transmitting medium. *II Nauchno-tekhnicheskaya konferenciya molodyh uchenyh i specialistov: materialy konferencii*. Moscow: NP «CRP ZelAO Moskvu», 2010, pp. 32. (In Russ.)
7. Temperature sensor with 1-Wire interface. URL: <http://mypractic.ru/ds18b20-datchik-temperatury-s-interfejsom-1-wire-opisanie-na-russkom-yazyke.html> (accessed: 05.09.2023). (In Russ.)
8. Connection of the heart rate sensor. URL: http://www.electronica52.in.ua/proekty-arduino/arduino_ad8232 (accessed: 05.09.2023). (In Russ.)
9. Pulse oximetry from Maxim: the new MAX30102. URL: <https://www.compel.ru/lib/77838> (accessed: 07.09.2023). (In Russ.)
10. Connecting the ADXL345 accelerometer to Arduino. URL: <https://robot-kit.ru/article/Accelerometer-Arduino-ADXL345> (accessed: 07.09.2023). (In Russ.)
11. Radio module nRF24L01. Overview. URL: <https://robototekhnika.ru/content/article/radiomodul-nrf24l01-chast-1-obzor> (accessed: 08.09.2023). (In Russ.)
12. Arduino Nano V3.0 CH340 on ATmega328. URL: <https://compactool.ru/viewtovar.php?id=482> (accessed: 06.09.2023). (In Russ.)

Received 13.09.2023

АНТЕННЫ, АФУ И УСТРОЙСТВА СВЧ

УДК 004.852

АНТЕННЫ ДЛЯ РАЗМЕЩЕНИЯ НА БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТАХ

Котков К.В., Минкин М.А.

Самарское инновационное предприятие радиосистем, Самара, РФ

E-mail: mma@siprs.ru

Широкое распространение беспилотных летательных аппаратов различного назначения, расширяющиеся сферы их применения и постоянно возрастающие требования по стойкости каналов связи настоятельно требуют создания новых эффективных антенных решений для аппаратуры командных радиолиний управления и полезной нагрузки. Статья посвящена краткому анализу имеющихся сведений о радиолиниях беспилотных летательных аппаратов, решений в области антенн для аппаратуры командных радиолиний управления и полезной нагрузки и исследованию перспективных антенн для размещаемых на беспилотных летательных аппаратах ретрансляторов. Проведенный обзор основных типов антенн, устанавливаемых на корпус беспилотного летательного аппарата, включая штыревые, микрополосковые и спиральные, а также антенные решетки на их основе, позволил обосновать перспективность использования низкопрофильных и спиральных антенн для ретрансляторов, размещаемых на беспилотных летательных аппаратах. Проведенные исследования частотных и пространственных характеристик низкопрофильных и спиральных антенн подтвердили их достаточную эффективность. Предложенные решения могут быть положены в основу разработки перспективных антенн для ретрансляторов, размещаемых на беспилотных летательных аппаратах.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, ретранслятор на беспилотном летательном аппарате, антенна низкопрофильная, антенна спиральная

Введение

Широкое распространение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) различного назначения, расширяющиеся сферы их применения и постоянно возрастающие требования к стойкости каналов связи БПЛА, в том числе к воздействию средств радиоэлектронной борьбы (РЭБ), настоятельно требуют создания новых эффективных антенных решений для аппаратуры командных радиолиний управления и полезной нагрузки. Настоящая статья посвящена краткому анализу имеющихся сведений о радиолиниях БПЛА, существующих решений в области антенн для аппаратуры командных радиолиний управления и полезной нагрузки и исследованию перспективных антенн для размещаемых на БПЛА ретрансляторов.

Радиолинии беспилотных летательных аппаратов

Современные БПЛА в большинстве случаев решают следующие основные задачи [1; 2]:

- ведение наблюдения и разведки;
- нанесение ударов по наземным / надводным целям, самостоятельно или носимыми средствами поражения;
- постановка радиоэлектронных помех;
- целеуказание для других средств поражения, а также корректировка их применения;
- транспортировка и доставка грузов и средств в заданный район;
- ретрансляция данных между удаленными абонентами сетей связи;
- отвлечение внимания или использование их в качестве ложных воздушных целей.

Различают следующие типы БПЛА, отличающиеся конструкцией и принципом работы, взлета/посадки и назначения [3]:

- БПЛА самолетного типа;
- мультироторные БПЛА;
- БПЛА аэростатического типа;



– беспилотные конвертопланы и гибридные модели.

Внешний вид БПЛА двух из перечисленных выше типов приведен на рисунке 1.

Как было отмечено выше, основные задачи, решаемые БПЛА, достаточно многообразны.

Соответственно, система радиосвязи БПЛА представляет собой совокупность радиолиний, в которых передаются данные принципиально различного типа, уровня важности, объема, уровня криптозащиты и т.д. Для управления и обмена данными с БПЛА организуются следующие направления связи:

- направление «вверх» – организуется от пункта управления (ПУ) к БПЛА и включает в себя направление «вверх» командной радиолинии управления (КРУ) для передачи команд управления БПЛА, а также команд управления специальной аппаратурой и техническими средствами полезной нагрузки, размещенными на БПЛА;
- направление «вниз» – организуется от БПЛА к ПУ и включает в себя направление «вниз» КРУ для передачи телеметрической информации о состоянии подсистем БПЛА, специальной аппаратуры и технических средств полезной нагрузки, а также квитанций о выполнении команд управления;
- высокоскоростная линия передачи данных от специальной аппаратуры и технических средств полезной нагрузки, размещенных на БПЛА.

Вышеуказанные линии связи могут организовываться в различных частотных диапазонах, использовать различные режимы с ретрансляцией и без нее, использовать различные сигнально-кодовые конструкции, специально адаптированные под тип и важность передаваемых данных [2].

Для организации КРУ и высокоскоростной передачи телеметрии и данных на наземный ПУ используются следующие диапазоны [2]:



Рисунок 1. БПЛА самолетного типа (а) и мультироторный (б)

- УКВ (ультракороткие волны) (220-400 МГц);
- L (1,4-1,85 ГГц);
- S (2,2-2,5 ГГц);
- C (4,4-5,85 ГГц);
- Ku (15,15-15,35/14,4-14,83 ГГц).

Связь организуется в пределах прямой видимости. Для связи на дальние расстояния могут использоваться БПЛА-ретрансляторы, а также системы спутниковой связи (ССС).

При организации КРУ специальных и военных больших и средних БПЛА через СССР, как правило, используются СССР Iridium, Inmarsat, MOUS, WGS и аналогичные. Линии связи формируются в УКВ, L, X, Ku, Ka диапазонах. Для управления специальными и военными малыми БПЛА, как правило, организуется КРУ в режиме прямой видимости с наземным ПУ или с узлом ретрансляции [2]:

- в диапазонах L (1,4–1,85 ГГц), S (2,2–2,5 ГГц), C (4,4–5,85 ГГц), и Ku (15,15–15,35 / 14,4–14,83 ГГц) – основные каналы КРУ;
- в УКВ диапазоне (220–400 МГц) – резервные каналы КРУ;
- через СССР L-диапазона (1,616-1,6265 ГГц) – резервный канал КРУ, устанавливаемый опционально на отдельных БПЛА.

Антенны беспилотных летательных аппаратов

Отечественные и зарубежные разработчики и производители предлагают ряд решений антенных систем для оборудования БПЛА и ПУ, а также средств РЭБ с БПЛА, на примере которых можно оценить номенклатуру и основные тенденции [4–8].

По результатам анализа литературных источников можно выделить следующие основные типы антенн, устанавливаемых на корпус БПЛА.

Штыревые антенны. Данные антенны получили наибольшее распространение в силу простоты разработки и изготовления. Полноразмерные штыревые антенны достаточно высоки (четверть длины волны и более), поэтому достаточно часто используются укороченные антенны с концевыми емкостными нагрузками. Для улучшения аэродинамических характеристик используются обтекатели килевидной формы (рисунок 2а).

Микрополосковые антенны (рисунок 2б) обладают малой высотой (порядка нескольких мм) и могут размещаться конформно, непосредственно на корпусе БПЛА.

Спиральные антенны (рисунок 2 в, г, д) реализуют круговую поляризацию радиоволн и способны обеспечивать хорошие направленные

свойства или (при снижении требований к коэффициенту усиления) быть достаточно широкополосными.

Линейные, плоские и кольцевые антенные решетки на основе штыревых или микрополосковых излучателей. Их применение оправдано лишь на достаточно больших БПЛА.

Антенны для ретрансляторов, размещаемых на беспилотных летательных аппаратах

Как уже было отмечено выше, одной из распространенных функций аппаратуры полезной нагрузки БПЛА является ретрансляция данных между удаленными абонентами сетей связи. При этом ретрансляторы на БПЛА могут использоваться как самостоятельно, так и в составе группировки, а также в сочетании с другими средствами ретрансляции (рисунок 3) [9].

В качестве антенн размещаемых на БПЛА ретрансляторов, в зависимости от диапазона рабочих частот, требований к диаграммам направленности и других тактико-технических требований, могут использоваться антенны различных упомянутых выше типов. В частности, в работе [10] приведены результаты исследований характеристик штыревых антенн, многоэлементных планарных антенн типа «перевернутое F» (Planar Inverted-F Antenna, PIFA) и кольцевой антенной решетки на основе излучателей Уда-Яги при их установке на БПЛА самолетного и мультироторного типов.

Однако, для размещения на относительно малогабаритных квадрокоптерах, включая «привязные» (с электрической силовой установкой и питанием по кабелю с земли), могут быть рекомендованы достаточно эффективные компактные решения на основе одиночных низкопрофильных излучателей PIFA и плоских спиральных излучателей.

Внешний вид предлагаемых излучающих структур приведен на рисунке 4.

Низкопрофильная антенна (рисунок 4а) представляет собой структуру PIFA с дополнительными пассивными проводниками [11]. Активный проводник возбуждается традиционным способом – вертикальным штырем, являющимся продолжением центрального проводника 50-Омной коаксиальной линии, подходящей со стороны основания. Компактность антенны открывает возможность ее использования на малогабаритных БПЛА.

Спиральная антенна (рисунок 4б) образована излучающей структурой в виде плоской двухзаходной логарифмической спирали [12]. Вход ан-

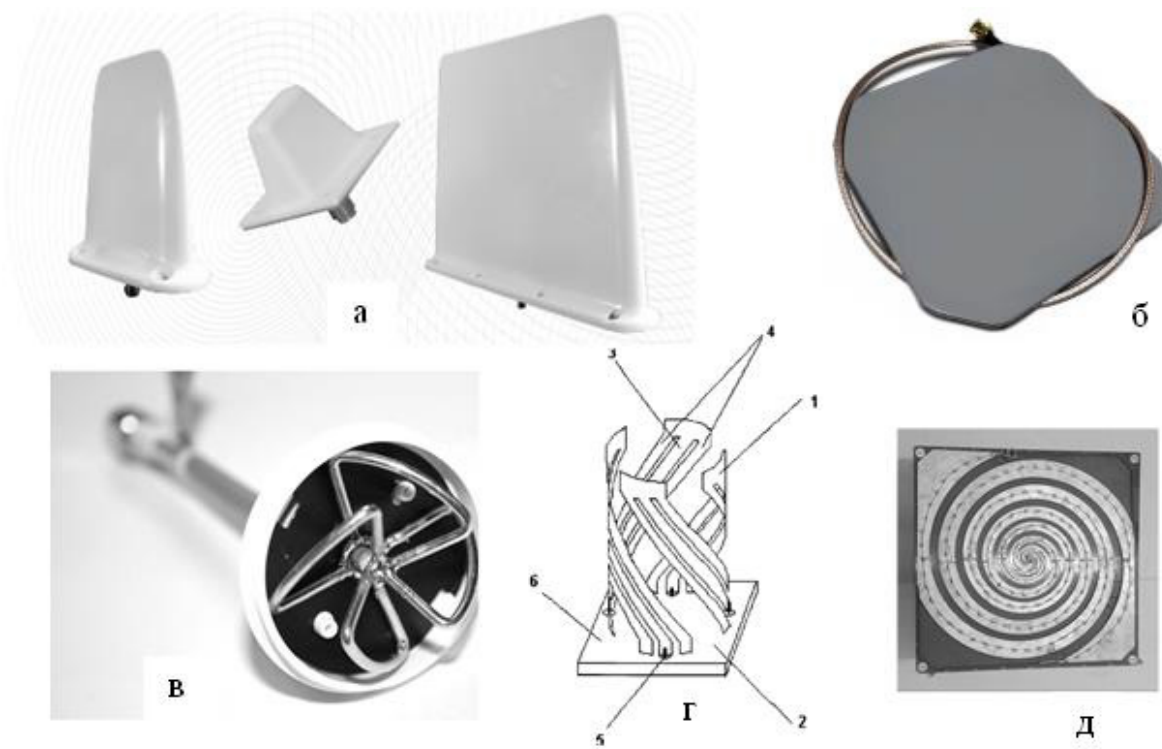


Рисунок 2. Примеры антенн БПЛА. Штыревые килевидные (а), конформные (б), спиральные: «леденец» (в), квадрифилярная (г), плоская (д)

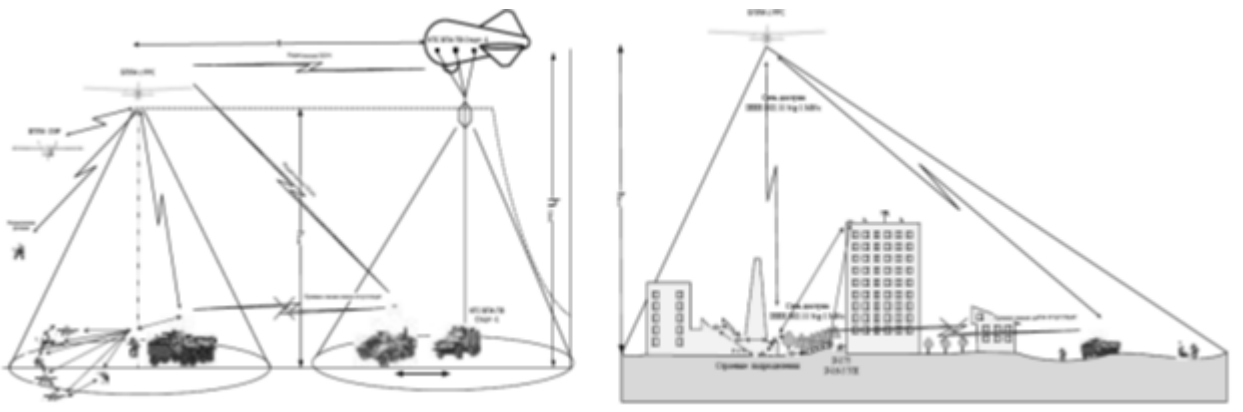


Рисунок 3. Ретрансляторы на БПЛА

тенны – симметричный, волновое сопротивление 200 Ом. Согласование с несимметричным трактом 50 Ом, при необходимости, осуществляется обычным способом – с помощью широкополосного трансформатора 50/200 Ом на длинных линиях с ферритовым магнитопроводом.

Расчеты основных характеристик обеих антенн проводились на основе методов и моделей, включая модель объекта установки (квадрокоптера), описанных в [10], для вариантов размещения антенн на нижней поверхности фюзеляжа квадрокоптера. Диапазоны рабочих частот были выбраны условно.

При этом для спиральной антенны рассматривались два варианта установки:

- горизонтальный (плоскость антенны параллельна нижней поверхности фюзеляжа), для связи с корреспондентами на Земле;
- вертикальный (плоскость антенны перпендикулярна нижней поверхности фюзеляжа), для связи с корреспондентами на воздушных носителях, прежде всего – с другими БПЛА.

Излучение/прием спиральной антенной волн круговой поляризации создает дополнительные преимущества, связанные с уменьшением зависимости уровня сигналов от эффектов деполяризации на трассах распространения радиоволн.

На рисунке 5 приведена характеристика коэффициента стоячей волны напряжения (КСВН) низкопрофильной антенны, установленной на БПЛА.

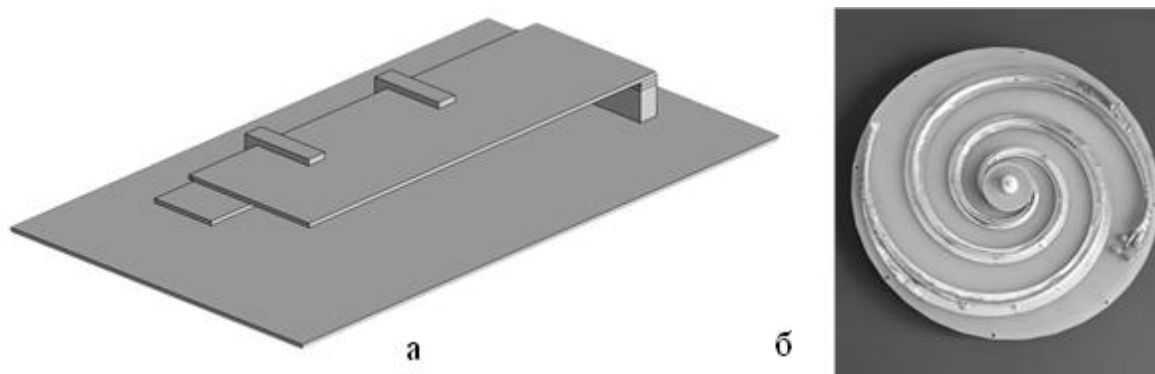


Рисунок 4. Излучающие структуры низкопрофильной (а) и спиральной (б) антенн для ретрансляторов на БПЛА

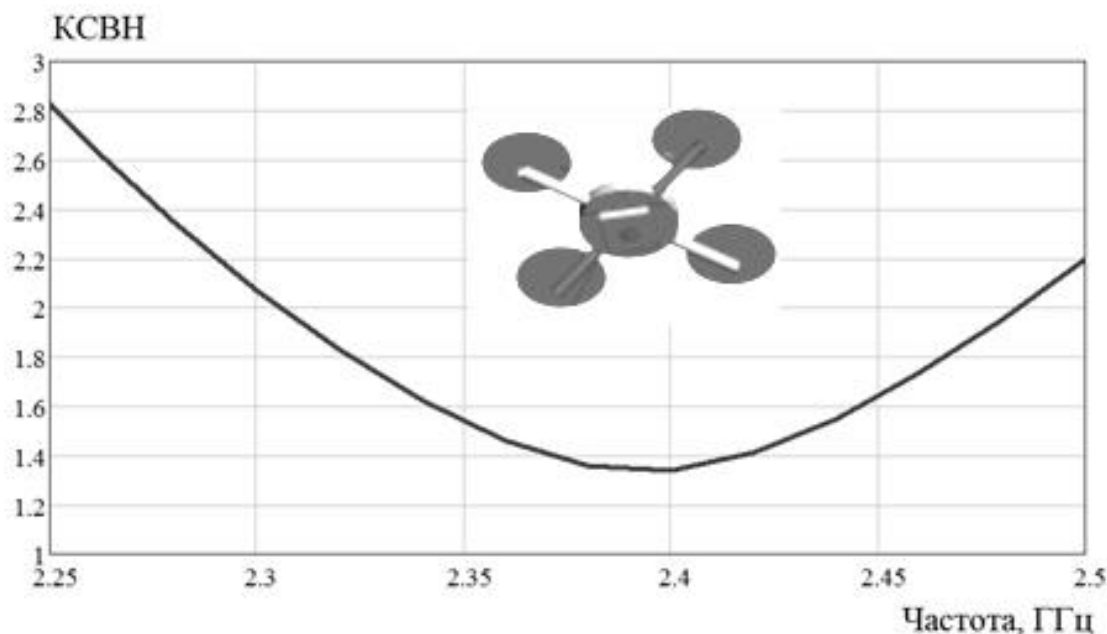


Рисунок 5. КСВН низкопрофильной антенны на квадрокоптере

Ширина рабочей полосы частот относительно невелика (около 7% по уровню КСВН не более 2,0), однако вполне достаточна для ретрансляции сигналов радиосвязи и широкополосного радиодоступа.

Характеристики направленности низкопрофильной антенны, установленной на БПЛА, на частоте 2,4 ГГц приведены на рисунке 6.

В азимутальной плоскости обеспечивается диаграмма направленности, достаточно близкая к круговой, с неравномерностью около 6 дБ. Угломестная диаграмма направленности – однолепестковая, ориентированная вертикально вниз, что соответствует тактическим требованиям, соответствующим ретрансляции сигналов наземных корреспондентов. Ширина лепестка по уровню 6 дБ – примерно 90°.

На рисунке 7 приведена характеристика КСВН спиральной антенны, размещенной на квадрокоптере.

В данном случае обеспечивается согласование в широкой полосе частот (около 130% по уровню КСВН 2,0).

Характеристики направленности спиральной антенны, установленной на БПЛА горизонтально, на частоте 1 ГГц приведены на рисунке 8.

В азимутальной плоскости обеспечивается диаграмма направленности, близкая к круговой (неравномерность менее 2 дБ). Угломестная диаграмма направленности, как и в предыдущем случае, однолепестковая, направленная вниз. Ширина лепестка по уровню 6 дБ – примерно 100°.

При вертикальной установке спиральной антенны на БПЛА (рисунок 9) формируются характеристики направленности, необходимые для ретрансляции сигналов, поступающих с других воздушных объектов.

Азимутальная диаграмма направленности – двухлепестковая, поэтому для эффективного приема необходима ориентация антенны на корре-

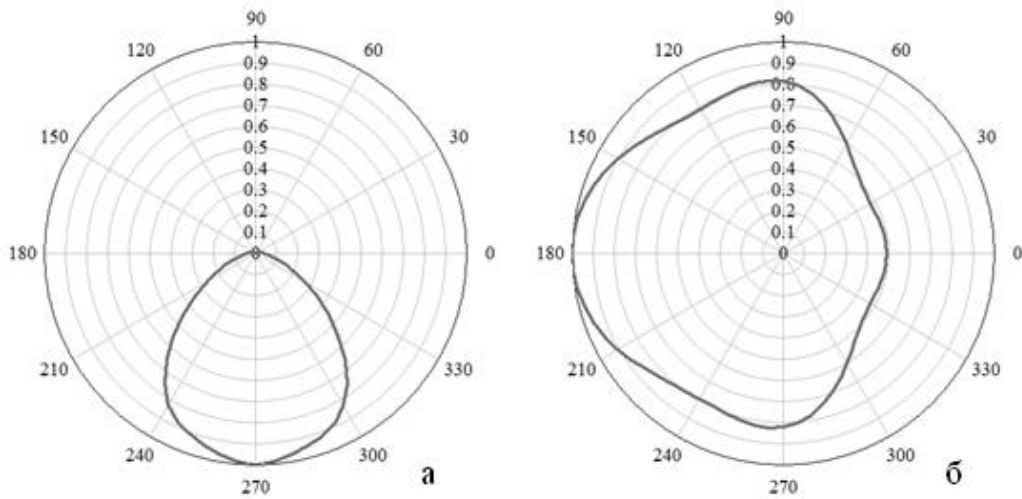


Рисунок 6. Угломестная (а) и азимутальная (б) диаграммы направленности низкопрофильной антенны на квадрокоптере

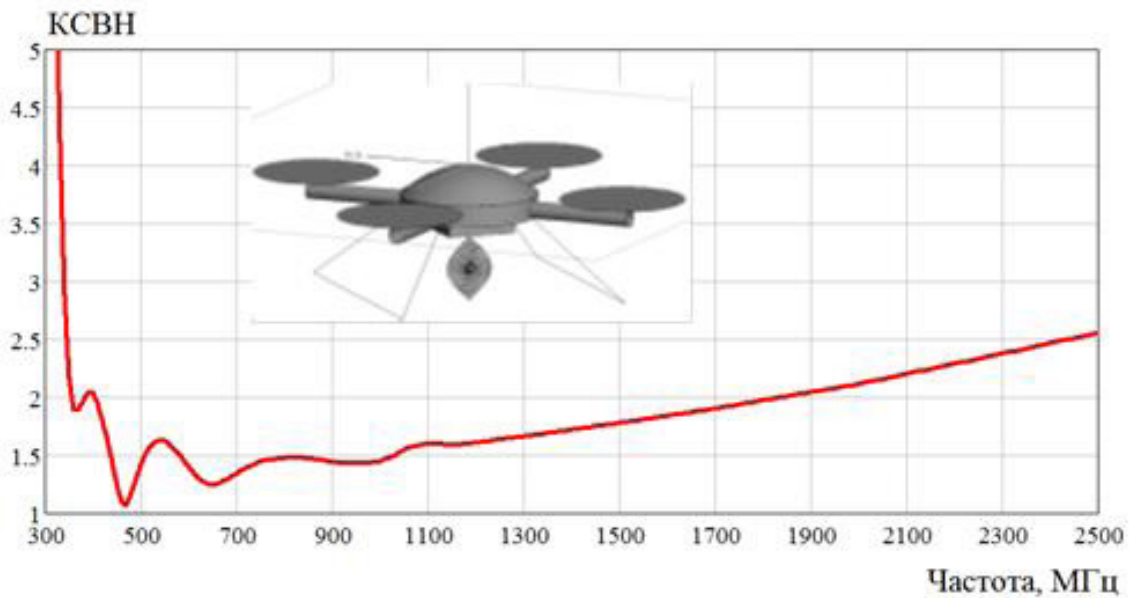


Рисунок 7. КСВН спиральной антенны на квадрокоптере

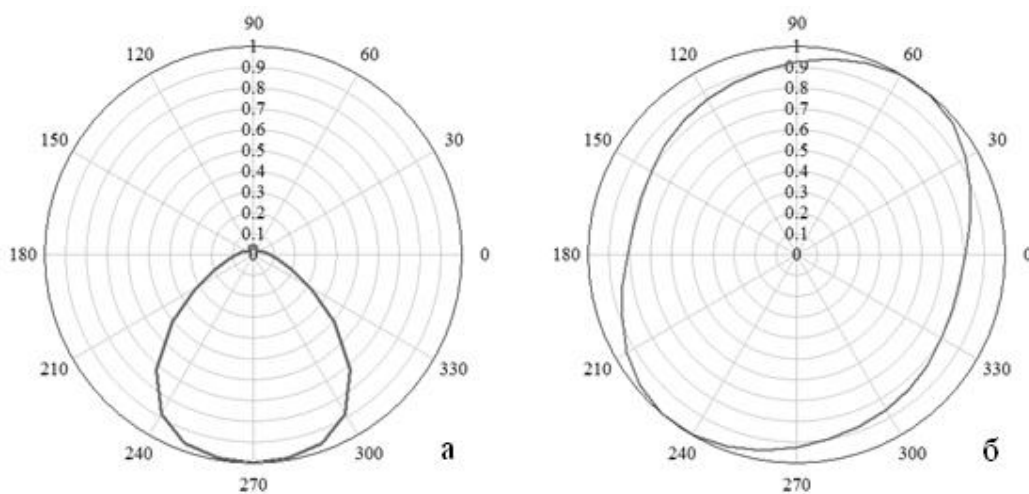


Рисунок 8. Угломестная (а) и азимутальная (б) диаграммы направленности спиральной антенны на квадрокоптере при горизонтальной установке

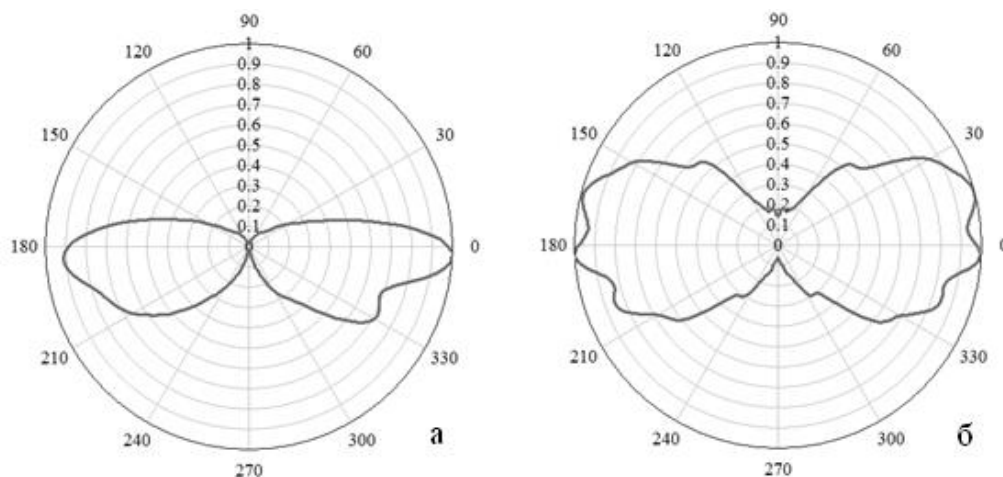


Рисунок 4. Излучающие структуры низкопрофильной (а) и спиральной (б) антенн для ретрансляторов на БПЛА

спондента. Ширина каждого лепестка по уровню 6 дБ – около 90°. Соответственно, два комплекта оборудования ретрансляции с такими антеннами способны обслуживать все азимутальные направления.

Угломестная диаграмма направленности в верхней полусфере несколько «сжата» вследствие экранирующего действия корпуса БПЛА.

Следует отметить, что весьма перспективным представляется гибкое решение на основе оперативного изменения (по команде или адаптивно) ориентации спиральной антенны, с вертикальной на горизонтальную и обратно, в соответствии с тактической обстановкой.

Выводы

Проведенный анализ имеющихся сведений о радиолиниях БПЛА и существующих решений в области антенн для аппаратуры командных радиолиний управления и полезной нагрузки позволил обосновать перспективность использования низкопрофильных и спиральных антенн для ретрансляторов, размещаемых на БПЛА.

Проведенные исследования частотных и пространственных характеристик низкопрофильных и спиральных антенн при размещении на БПЛА подтвердили их достаточную эффективность.

Предложенные решения могут быть положены в основу разработки перспективных антенн для ретрансляторов, размещаемых на БПЛА.

Литература

1. Макаренко С.И., Иванов М.С. Сетевая война – принципы, технологии, примеры и перспективы: монография. СПб.: Научно-технические технологии, 2018. 898 с.
2. Макаренко С.И. Противодействие беспилотным летательным аппаратам: монография. СПб: Научно-технические технологии, 2020. 204 с.
3. Беспилотная авиация: терминология, классификация, современное состояние / В.С. Фетисов [и др.]. Уфа: ФОТОН, 2014. 217 с.
4. Высокоэффективные антенные системы для беспилотных летательных аппаратов. URL: <https://ascam.aero/vyisokoeffektivnyie-antennyie-sistemyi-bespilotnyih-letatelnyih-apparatov/> (дата обращения: 03.05.2023).
5. Drone antenna types and simulation. URL: <https://www.cenos-platform.com/post/drone-antenna-types-simulation> (дата обращения: 15.04.2023).
6. Wireless Edge Ltd. Military antennas. URL: <https://www.mtiwe.com/?CategoryID=165&ArticleID=79> (дата обращения: 15.05.2023).
7. Drone antenna. URL: <https://www.aeroexpo.online/aeronautic-manufacturer/drone-antenna-3401.html> (дата обращения: 01.04.2023).
8. UAV Antenna Solutions. URL: <https://www.taoglas.com/product-cat-gory/iot-applications/uav-antenna-solutions/> (дата обращения: 15.04.2023).
9. Пылаев Н.А. Перспективы применения БЛА в качестве носителей ретрансляторов связи // Перспективы развития и применения комплексов с беспилотными летательными аппаратами: материалы II научно-практической конференции. Коломна: 924-й Государственный центр беспилотной авиации МО РФ, 2017. С.274–280.
10. Расчеты характеристик антенн для связи и ретрансляции, размещаемых на беспилотных летательных аппаратах самолетного и вертолетного типов / А.Л. Бузов [и др.] // Радиотехника. 2023. №6. С. 100–108.

11. Герасимов И.А., Минкин М.А. Сравнительный анализ характеристик низкопрофильной и штывровой антенн автомобильных абонентских радиостанций // Антенны. 2017. №4. С.48–54.
12. Копылов Д.А., Котков К.В. Антенны для увеличения дальности радиосвязи портативными

радиостанциями, оптимизированные с учетом температурных зависимостей и технологических допусков // Радиотехника. 2022. №6. С.61–66.

Получено 23.05.2023

Котков Константин Витальевич, директор по развитию и гражданской продукции Акционерного общества «Самарское инновационное предприятие радиосистем» (АО «СИП РС»). 443052, Российская Федерация, г. Самара, ул. Земеца, 26Б. Тел. +7 846 203-14-64. E-mail: kkv@siprs.ru

Минкин Марк Абрамович, д.т.н., главный научный сотрудник научного отдела 3 АО «СИП РС». 443052, Российская Федерация, г. Самара, ул. Земеца, 26Б. Тел. +7 846 203-19-63. E-mail: mma@siprs.ru

ANTENNAS FOR INSTALLATION ON UNMANNED AERIAL VEHICLES

Kotkov K.V., Minkin M.A.

Samara Innovative Enterprise of Radio Systems, Samara, Russian Federation

E-mail: mma@siprs.ru

The widespread use of unmanned aerial vehicles for various purposes, expanding scope of their application and ever-increasing requirements for the durability of communication channels urgently require the development of new effective antenna solutions for the equipment of command radio control lines and payloads. The article is devoted to a brief analysis of the available information about the radio lines of unmanned aerial vehicles, solutions in the field of antennas for the equipment of command control radio lines and payload and the study of perspective antennas for the repeaters placed on unmanned aerial vehicles. The review of the general types of antennas that may be installed on unmanned aerial vehicles, including pin, microstrip and spiral ones, as well as antenna arrays based on them, made it possible to substantiate the prospects of using low-profile and spiral antennas for repeaters installed on unmanned aerial vehicles. The studies conducted on the frequency and spatial characteristics of low-profile and spiral antennas have confirmed their sufficient effectiveness. Proposed solutions can be used as a basis for development of perspective antennas for repeaters installed on unmanned aerial vehicles.

Keywords: *unmanned aerial vehicle, repeater on an unmanned aerial vehicle, low-profile antenna, spiral antenna*

DOI: 10.18469/ikt.2023.21.1.05

Kotkov Konstantin Vitaliyevich, Samara Innovative Enterprise of Radio Systems, 26B, Zemetsa Street, Samara, 443052, Russian Federation; Director of Development and Civil Products. Tel. +7 846 203-14-64. E-mail: kkv@siprs.ru

Minkin Mark Abramovich, Samara Innovative Enterprise of Radio Systems, 26B, Zemetsa Street, Samara, 443052, Russian Federation; Chief Researcher of the Scientific Department of 3, Doctor of Technical Sciences. Tel. +7 846 203-19-63. E-mail: mma@siprs.ru

References

1. Makarenko S.I., Ivanov M.S. *Network-centric warfare – principles, technologies, examples and prospects: Monograph*. Saint Petersburg: Naukoemkie tekhnologii, 2018, 898 p. (In Russ.)
2. Makarenko S.I. *Countering unmanned aerial vehicles: Monograph*. Saint Petersburg: Naukoemkie tekhnologii, 2020, 204 p. (In Russ.)
3. Fetisov V.S. et al. *Unmanned aviation: terminology, classification, current state*. Ufa: FOTON, 2014, 217 p. (In Russ.)

4. Highly efficient antenna systems for unmanned aerial vehicles. URL: <https://ascam.aero/vyisokoefektivnyie-antennyie-sistemyi-bespilotnyih-letatelnyih-apparatov/> (accessed: 03.05.2023). (In Russ.)
5. Drone antenna types and simulation. URL: <https://www.cenos-platform.com/post/drone-antenna-types-simulation> (accessed: 15.04.2023).
6. Wireless Edge Ltd. Military antennas. URL: <https://www.mtiwe.com/?CategoryID=165&ArticleID=79> (accessed: 15.05.2023).
7. Drone antenna. URL: <https://www.aeroexpo.online/aeronautic-manufacturer/drone-antenna-3401.html> (accessed: 01.04.2023).
8. UAV Antenna Solutions. URL: <https://www.taoglas.com/product-category/iot-applications/uav-antenna-solutions/> (accessed: 15.04.2023).
9. Pylaev N.A. Prospects for the use of UAVs as carriers of communication repeaters. *Perspektivy razvitiya i primeneniya kompleksov s bespilotnymi leta-tel'nyimi apparatami: materialy II nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Kolomna: 924th State Center of Unmanned Aviation of the Ministry of Defense of the Russian Federation, 2017, pp.274–280. (In Russ.)
10. Buzov A.L. et al. Characteristic calculations of antennas for communication and retransmission placed on aircraft and helicopter unmanned aerial vehicles. *Radiotekhnika*, 2023, no. 6, pp. 100–108. (In Russ.)
11. Gerasimov I.A., Minkin M.A. Comparative analysis of the characteristics of a low-profile and whip antennas car radio subscriber. *Antenny*, 2017, no. 4, pp.48–54. (In Russ.)
12. Kopylov D.A., Kotkov K.V. Antennas for increasing the range of radio communication by portable radio stations, optimized taking into account temperature dependencies and technological tolerances. *Radiotekhnika*, 2022, no. 6, pp.61–66. (In Russ.)

Received 23.05.2023

РАДИОПЕРЕДАЮЩИЕ И РАДИОПРИЕМНЫЕ УСТРОЙСТВА, ТЕЛЕВИДЕНИЕ

УДК 004

СИСТЕМНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ОБОРУДОВАНИЮ ТЕЛЕВИЗИОННОГО ВЕЩАНИЯ В РОССИИ

Карякин В.Л.

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

Эксплуатация несертифицированного оборудования телерадиовещания, находящегося в 85 регионах России, является важнейшей проблемой развития региональных сетей вещания при отсутствии системных требований к сетевым передатчикам и наземным станциям спутниковых ретрансляторов в отечественном стандарте «Телевидение вещательное цифровое. Система эфирного наземного цифрового телевизионного вещания второго поколения DVB-T2». Системные требования в стандарте являются основой актуализации требований к оборудованию при его сертификации. На основе проведенных автором исследований, опубликованных в отечественных и зарубежных статьях, защищенных патентами Российской Федерации, представлены требования, предъявляемые к сетевым передатчикам и земным станциям спутниковых ретрансляторов в одночастотных сетях телерадиовещания. В частности, сформулированы системные требования к оборудованию при формировании регионального мультиплекса, по метрологическому обеспечению эксплуатации одночастотных сетей SFN (Single Frequency Network) и по распределенной системе мониторинга качества телерадиовещания стандарта DVB-T2. Представлены также требования по оценке эффективности работы сетей SFN, что позволит в дальнейшем модернизировать существующие региональные сети для повышения их надежности и качества телерадиовещания во всех 85 регионах РФ, сертифицировать оборудование в соответствии с постановлением Правительства Российской Федерации. Результаты, проведенных автором исследований, позволят разработать системный проект по созданию эфирного цифрового телевизионного вещания в четырех новых регионах России. Рассматриваются перспективы развития оборудования стандарта DVB-T2 на программном уровне.

Ключевые слова: Телевизионное вещание, системные требования, стандарт DVB-T2, региональные сети, мультиплекс, сертификация, системный проект

Введение

Эксплуатация несертифицированного оборудования телерадиовещания в России является важнейшей проблемой развития региональных сетей вещания [1] при отсутствии системных требований к сетевым передатчикам и наземным станциям спутниковых ретрансляторов в отечественном стандарте ГОСТ Р 58912-2020. Системные требования в стандарте являются основой актуализации требований к оборудованию при его сертификации в соответствии с постановлением Правительства РФ от 4 февраля 2022 г. № 113.

При изучении материалов стандарта ГОСТ Р 58912-2020 «Телевидение вещательное цифровое. Система эфирного наземного цифрового телевизионного вещания второго поколения DVB-T2» возник ряд серьезных замечаний к содержанию раздела 12, которые опубликованы в статье [1] и в видеороликах Telegram канала VLKaryakin [2] 30 апреля (замечания к содержанию стандарта) и 11 декабря (системные требования к оборудованию) 2022 года. Основной разработчик стандарта ГОСТ Р 58912-2020 ФГБУ НИИР (научно-исследовательский институт радио, г. Москва).

Специалисты НИИР, ознакомившись с критическими замечаниями к тексту раздела 12, изложенными в статье [1] и в видеоролике от 30 апреля в Telegram канале [2], не высказали возражений по опубликованным замечаниям ни по одной из четырех тем раздела 12 стандарта ГОСТ Р 58912-2020. Руководство НИИР считает, что поднятые вопросы являются актуальными и своевременными.

Задача разработки общих системных требований ко второй версии стандарта в кратчайшие сроки чрезвычайно актуальна, поскольку уже в ближайшее время необходимо будет разворачивать цифровое телевизионное вещание еще в четырех регионах России.

В этой связи руководством НИИР предложено сформулировать общие системные требования к передатчикам и наземным станциям спутниковых ретрансляторов в одночастотных сетях телерадиовещания и обсудить их среди широкого круга заинтересованных специалистов в области разработки и производства аппаратуры телерадиовещания, заинтересованных развитием современного эфирного телевидения в России, не уступающего кабельному, компьютерному и спутниковому цифровому телевидению по своей

надежности, контенту вещания, охвату населения и доступности для зрителей всех возрастов.

Необходимо активно конкурировать в различных видах цифрового телевидения по интерактивности, качеству контента, бороться за привлечение молодых зрителей и спонсоров телерадиовещания, которые являются, в первую очередь, индикаторами успешности вещателей и конкурентоспособности эфирного телевидения в России.

Существующий в настоящее время стандарт в своей основе (1–11 разделы) разработан на базе обязательного (EN) европейского стандарта. Однако, 12 раздел, раскрывающий техническую спецификацию одночастотных сетей, вызывает отторжение, поскольку ограничивает дальнейшее развитие цифрового телевидения. Технические решения в сетях с распределенной модификацией, предлагаемые в 12 разделе стандарта, создают тупиковую ситуацию и не позволяют бороться за привлечение молодых зрителей и спонсоров телерадиовещания.

Уход значительного числа спонсоров и безразличное отношение молодого поколения телезрителей к эфирному телевидению подтверждает необходимость выхода из создавшейся ситуации, несмотря на «успешное» завершение Федеральной Целевой Программы «Развитие телерадиовещания в Российской Федерации на 2009 – 2018 годы», по мнению руководства вещателей и ряда заинтересованных специалистов.

Задачей настоящей статьи является разработка системных требований, предъявляемых к сетевым передатчикам и наземным станциям спутниковых ретрансляторов в одночастотных сетях телерадиовещания с целью доработки отечественного стандарта DVB-T2, что позволит в дальнейшем модернизировать существующие региональные сети для повышения их надежности и качества телерадиовещания во всех 85 регионах РФ, как и сертифицировать оборудование в соответствии с постановлением Правительства РФ. Кроме того, это позволит разработать системный проект по созданию эфирного цифрового телевизионного вещания еще в четырех регионах России с учетом замечаний и рекомендаций автора, опубликованных в отечественных и зарубежных статьях, защищенных патентами РФ.

Учитывая критические замечания по 12 разделу стандарта, изложение требований к оборудованию телерадиовещания осуществляется в порядке замечаний, сформулированных ранее в [1; 2].

1. Формирование регионального мультиплекса

1.1 Замечания по Разделу 12.1.1 стандарта

1. Метод распределенной модификации противоречит основному требованию обязательного европейского стандарта (EN) телерадиовещания DVB-T2 – возможности проведения параметрической оптимизации с целью повышения эффективности работы одночастотных сетей SFN, с оцениваемой скоростью передачи данных при заданном запасе устойчивости по коэффициенту битовых ошибок.

2. В методе распределенной модификации нет технической возможности изменять значения параметров федерального потока в зависимости от условий вещания. При формировании регионального потока сохраняются значения параметров федерального потока. В результате модифицированный поток T2-MI на выходе реплеисеров ретрансляторов во всех 85 регионах имеет единые параметры, устанавливаемые в шлюзе Федерального центра мультиплексирования независимо от условий вещания и физических размеров сетей SFN в регионах.

3. Усложнение структуры ретрансляторов для формирования регионального мультиплекса приводит к значительному росту производственных затрат при внедрении и эксплуатации сетей, понижению их надежности. Высокая стоимость дополнительного оборудования не позволяет осуществлять его горячее резервирование, что также понижает надежность сетей.

4. Метод распределенной модификации ограничивает дальнейшее развитие цифрового эфирного телевидения, возможность перехода от стандартной четкости к высокой и сверхвысокой четкости, не позволяет реализовать в России надежное и бесперебойное телерадиовещание.

1.2 Требования по формированию регионального мультиплекса

1. Преимущества перехода от структуры SFN с распределенной модификацией программ федерального мультиплекса к структуре сети [3; 4] заключаются в технической возможности оптимизации ее параметров, благодаря которой обеспечивается требуемая скорость передачи данных, необходимый запас устойчивости работы, техническая реализуемость при эксплуатации в различных регионах РФ, что исключает технические остановки и технический брак региональных сетей SFN.

Область вещания региональной одночастотной сети содержит n зон вещания, в каждой из которых расположен передатчик стандарта DVB-T2, ретранслирующий информацию в зоне вещания от спутникового приемника стандарта DVB-S2, принимающего модифицированный федеральный поток через спутниковый ретранслятор от приемо-передающей станции регионального Центра мультиплексирования.

В зонах вещания передатчиков одночастотной сети SFN дополнительно размещено n датчиков коэффициента битовых ошибок BER, соединенных с помощью волоконно-оптических линий связи с оптическим мультиплексором, выход которого соединен с малой передающей спутниковой станцией VSAT, осуществляющей связь с земной приемо-передающей станцией регионального центра мультиплексирования по обратному каналу через спутниковый ретранслятор.

Информация о коэффициентах битовых ошибок в области вещания поступает с выхода приемо-передающей станции регионального Центра мультиплексирования через оптический демультиплексор на многоканальный приемник, имеющий в своем составе индикаторную панель.

На индикаторной панели многоканального приемника имеются шаблоны по запасу и порогу устойчивости сети цифрового телерадиовещания, номинальной и максимальной скорости передачи данных, упрощающие настройку сети SFN.

Цифровая обработка федерального потока, поступающего с выхода приемо-передающей станции, осуществляется в региональном центре мультиплексирования.

Следует отметить, что под цифровой обработкой федерального потока понимается замена значений его параметров на региональные, вставка рекламы, замещение части федеральных программ первого мультиплекса региональными в процессе вещания.

2. В ряде регионов с развитой оптоволоконной сетью целесообразно применять сеть SFN вещания с наземными волоконно-оптическими каналами связи [5; 6; 21]. Существенным преимуществом рассматриваемой сети SFN [6] по сравнению с сетями [4] является низкая стоимость регионального частотного спутникового ресурса, предназначенного для ее функционирования исключительно в резервном режиме при аварийных работах, связанных с реконструкцией или ремонтом наземных каналов связи.

Метод формирования модифицированного федерального потока T2-MI в региональном центре

мультиплексирования, предлагаемый в патенте [6], аналогичен методу формирования модифицированного потока T2-MI в патенте [4].

Данный метод [6] формирования модифицированного федерального потока T2-MI позволяет устанавливать параметры работы региональной сети SFN, необходимые для заданного запаса устойчивости по коэффициенту битовых ошибок BER при максимальной скорости передачи данных.

Уменьшение влияния изменения задержек в волоконно-оптических каналах связи на работу SFN достигается включением в области вещания блока буферизации с задержкой, значительно превышающей изменения задержки сигнала в активном канале связи в процессе эксплуатации.

Учитывая, что сеть SFN должна устойчиво работать в резервном режиме при переключении на спутниковые каналы связи, время буферизации задается равным времени задержки информационного сигнала при прохождении через спутниковый ретранслятор с учетом задержек в магистральной части волоконно-оптического канала.

Распределение сигнала в зоны вещания осуществляется с помощью оптического разветвителя, установленного на выходе блока буферизации. В пределах области вещания, ввиду небольших расстояний от оптического разветвителя до передатчиков (менее 100 км), используются пассивные волоконно-оптические каналы связи с минимальными собственными задержками.

В зонах вещания каждый передатчик снабжен управляемой линией задержки в модуляторах для калибровки собственных задержек и переключателем режимов работы с основного наземного на спутниковый резервный режим с использованием региональных спутниковых каналов связи.

Техническая реализация управляемой линии задержки в модуляторах передатчиков стандарта DVB-T2 описана в [8].

Важным условием работы сети SFN является возможность перехода из штатного режима в резервный режим для подачи информационного сигнала из регионального центра мультиплексирования по спутниковым каналам связи.

2. Метрологическое обеспечение технической эксплуатации одночастотных сетей

2.1 Замечания по Разделам 12.1.2, 12.1.3 стандарта

Раздел 12.1.2 стандарта посвящен метрологическому обеспечению эксплуатации одночастотных сетей DVB-T2. В разделе 12.1.3 рассматривается метрологическое обеспечение эксплуатации

ТВ радиопередатчиков, работающих в составе ретрансляторов одночастотных сетей.

1. Изучив эти разделы, создается ощущение, что автор дает рекомендации либо не понимая принципа работы одночастотной сети, либо умышленно подгоняет эти рекомендации под необходимые с единственной целью – актуализации сертификатов соответствия без устранения существующих проблем в эксплуатации сети.

2. Отсутствуют системные рекомендации по обеспечению работоспособности одночастотных сетей.

В частности, нет информации при каких условиях обеспечивается синхронная работа сетевых передатчиков. Не представлены методы настройки одночастотных сетей с учетом разброса задержек в каналах передачи данных и модуляторах передатчиков.

2.2 Требования по метрологическому обеспечению технической эксплуатации одночастотных сетей

1. Существует европейский документ [9] ETSI TS 102 831 V1.2.1 (2012-08) Digital Video Broadcasting (DVB); Implementation guidelines for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2) (Цифровое видеовещание (DVB); Руководство по внедрению второго поколения системы цифрового наземного телевизионного вещания (DVB-T2)).

В руководстве [9] отмечается, что при работе в одночастотных сетях SFN необходима синхронизация передатчиков по частоте и по времени, которая применяется в системах DVB-T первого поколения и других системах, использующих ортогональное частотное разделение каналов с кодированием (Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing, COFDM).

В руководстве по внедрению системы цифрового наземного телевизионного вещания второго поколения (DVB-T2) [9] в разделе 9.1.6 дана методика тестирования и калибровки модуляторов. Определены относительный и абсолютный режимы тестирования модуляторов.

2. Вопросам калибровки модуляторов в сетевых ТВ передатчиках посвящен ряд статей в отечественных журналах [10; 11], а используемые при этом технологии защищены патентами РФ [6; 12].

Предлагаемые в этих публикациях метод и устройство калибровки, а также алгоритм настроек телевизионных передатчиков позволяют обеспечить синхронную работу сетей SFN при разбросах задержек информационного сигнала не только в модуляторах передатчиков, но и в каналах передачи данных.

3. Методы настройки одночастотных сетей с учетом разброса задержек в каналах передачи данных и модуляторах передатчиков широко освещены в современной научно-технической литературе [13; 14] и обсуждались на международных конференциях [15–18].

Суть требований к методу настройки передатчиков состоит в следующем: настройка передатчиков, входящих в состав одночастотной SFN сети, должна обеспечить равенство временных задержек, не превышающих 2 с, на всех передатчиках в полном соответствии с выбранной относительной меткой времени, устанавливаемой в формирователе транспортного потока T2-MI.

3. Оценка эффективности работы одночастотных сетей

3.1 Замечания по Разделу 12.1.4 стандарта

Раздел 12.1.4 стандарта посвящен качеству обслуживания и качеству впечатления/восприятия в телевизионных системах. Содержание этого раздела говорит о слабом знакомстве авторов с современными технологиями цифрового телерадиовещания.

Авторы раздела 12.1.4 стандарта ограничились общими рекомендациями, не отражающими специфику цифрового телерадиовещания.

3.2 Требования к оценке эффективности работы одночастотных сетей

1. Объективными оценками качества являются скорость передачи данных и запас устойчивости по коэффициенту битовых ошибок BER (Bit Error Ratio).

В технической литературе [3; 18; 19] введено понятие логарифмического коэффициента битовых ошибок для удобства анализа результатов измерения:

$$K_{\text{BER}} = \lg(1/\text{BER}) = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, \dots$$

Порог устойчивости – значение KBER, при котором прием цифрового ТВ сигнала становится невозможен. Обычно он находится в пределах от 2 до 3, но в каждом конкретном случае уточняется экспериментально.

Запас устойчивости – граница диапазона устойчивой работы сети SFN, ниже которой коэффициент битовых ошибок становится близок к его пороговому значению, при котором прием становится невозможен.

Для своевременного устранения причин, вызывающих увеличение числа битовых ошибок в сети SFN без потери качества приема ТВ вещания, KBER устанавливают обычно в пределах от 5 до 6.

Увеличение скорости передачи данных при сохранении запаса устойчивости позволяет переходить от вещания со стандартным качеством к вещанию с высоким или даже сверхвысоким качеством.

Этим вопросам посвящен ряд работ, опубликованных автором в России и за рубежом [3; 13; 16; 18; 20; 21], имеются патенты РФ [4; 19].

2. В соответствии с рекомендациями МСЭ-R BT.500-14 41 [22] существуют два класса субъективных оценок.

Первый – это оценки, которые определяют качество системы в оптимальных условиях работы; такие оценки обычно называют оценками качества.

Второй – это оценки, которые определяют способность системы поддерживать качество работы в неоптимальных условиях работы, обусловленных условиями передачи или распространения сигнала; такие оценки обычно называют оценками ухудшений.

Чтобы сделать наиболее подходящие субъективные оценки, необходимо прежде всего выбрать методику, которая наилучшим образом соответствует конкретным условиям и целям требуемой оценки изображения.

В телевизионном тестировании используется широкий спектр основных методов тестирования. Однако на практике для решения конкретных задач следует использовать определенные методы испытаний.

Часть 3 Рекомендаций [22] содержит указания к субъективной оценке качества изображения в соответствующих форматах.

Представляют интерес специализированные методики субъективной оценки качества изображения (см. стр. 63 рекомендаций МСЭ-R BT.500-14 41).

В частности, даны рекомендации к субъективной оценке качества цифровых телевизионных систем стандартной и высокой четкости.

4. Распределенная система мониторинга качества телерадиовещания стандарта DVB-T2

4.1 Замечания по Разделу 12.1.5 стандарта

Раздел 12.1.5 стандарта посвящен многоуровневому и распределенному мониторингу.

Содержание Раздела, к сожалению, ограничивается определениями и не содержит конкретных рекомендаций по решению существующих проблем.

В частности, требования по качеству вещания в штатном режиме достаточно жесткие:

- технический брак – нарушение нормальной работы SFN продолжительностью от 10 до 15 с;
- техническая остановка – нарушение нормальной работы SFN продолжительностью от 15 с до 10 мин;
- авария – нарушение нормальной работы SFN продолжительностью свыше 10 мин.

Операторы узнают о локальных проблемах в работе сетей от телезрителей по горячей линии, а о глобальных проблемах – при полной или частичной остановке вещания.

4.2 Требования к распределенной системе мониторинга качества телерадиовещания стандарта DVB-T2

Отсутствие технической возможности оценки запасов устойчивости сети неизбежно приводит к неопределенности в обеспечении ее работоспособности при эксплуатации и сложности оперативной оценки причин возникновения брака и технических остановок [23].

Способы и устройства мониторинга, запатентованные в РФ [4; 6; 19], позволяют провести диагностику запасов устойчивости сетей SFN, выявить и устранить причины отсутствия необходимых запасов устойчивости и перейти к параметрической оптимизации SFN, обеспечивающей заданную скорость передачи данных и требуемый запас устойчивости.

В [24; 25] рассмотрен прототип системы, предложенной для пилотной зоны, которая в дальнейшем может быть масштабирована на все регионы РФ для комплексной диагностики работоспособности сетей SFN.

Специфика цифрового телевидения заключается в том, что передатчики в зонах вещания могут излучать номинальную мощность, но прием у некоторых телезрителей при этом отсутствует.

Система позволит достоверно дифференцировать и локализовать проблему, которая может быть, как на стороне телезрителя, так и на стороне центров вещания.

5. Перспективы развития оборудования стандарта DVB-T2 на программном уровне

В последнее время в технике телекоммуникаций и телевизионного вещания успешно развивается приемо-передающее оборудование на программном уровне, получившее название SDR (Software Defined Radio). Разработка программного обеспечения на языке Python с открытым ко-

дом осуществляется с использованием бесплатного набора инструментов GNU Radio, который можно использовать с легкодоступным недорогим внешним радиочастотным оборудованием.

В частности, при применении устройства HackRF появляется возможность разработки SDR передатчиков на программном уровне в диапазоне до 6000 МГц. 19 августа 2023 года в [26] опубликован видеоролик с пробным вещанием на 25 телевизионном канале SDR передатчика стандарта DVB-T2. Для испытания применялся записанный телевизионный поток в формате ts, предоставленный руководством Самарского ОРТПЦ с тремя телевизионными программами: Россия 1, Россия 24, ОТР и одной радио программой Радио России.

Переход оборудования телевизионного вещания в РФ с аппаратного на программный уровень позволит при минимальных затратах решить перечисленные выше проблемы с учетом разработанных системных требований, увеличить количество мультиплексов, переходить от стандартного качества к высокому и обеспечить бесперебойное телерадиовещание в различных регионах России, благодаря возможности проведения параметрической оптимизации оборудования с учетом различных условий вещания в разных регионах РФ.

Заключение

1. Разработаны системные требования к сетевым передатчикам и земным станциям спутниковых ретрансляторов в одночастотных сетях телерадиовещания на основе анализа стандарта ГОСТ Р 58912-2020.

2. Решение поставленной задачи по разработке системных требований, предъявляемых к сетевым передатчикам и земным станциям спутниковых ретрансляторов в одночастотных сетях телерадиовещания, безусловно, актуально для развития цифрового телерадиовещания в России.

3. Помимо модернизации существующих региональных сетей и сертификации оборудования с учетом замечаний, и рекомендаций автора, защищенных патентами РФ, разработка системных требований позволит создать системный проект эфирного цифрового телевизионного вещания, превосходящего по своим качественным показателям, интерактивности и стоимости эксплуатации компьютерному и кабельному телевидению, еще в четырех регионах России.

4. Рассмотрены перспективы развития оборудования стандарта DVB-T2 на программном уровне.

5. Переход оборудования телевизионного вещания в РФ с аппаратного на программный уро-

вень позволит при минимальных затратах увеличить количество мультиплексов, переходить от стандартного качества к высокому и обеспечить бесперебойное телерадиовещание в разных регионах России

Литература

1. Карякин В.Л. Требования по эксплуатации спутниковых земных станций и передатчиков сети SFN в России // *Электросвязь*. 2022. № 5. С. 43–48.
2. Карякин В.Л. Требования по эксплуатации спутниковых земных станций и передатчиков сети SFN // Телеграмм-канал. URL: https://t.me/TV_VLK (дата обращения: 08.09.2023).
3. Карякин В.Л. Структурно-параметрическая оптимизация региональных сетей цифрового телерадиовещания РФ // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2018. Т.9, № 1. С. 80–84.
4. Карякин В.Л., Карякин Д.В., Морозова Л.А. Региональная сеть цифрового ТВ вещания стандарта DVB-T2: патент 2649415. Российская Федерация. № 2017112041 / В. Л. Карякин (RU), Д.В. Карякин (RU), Л.А. Морозова (RU); заявл.10.04.17; опубл. 03.04.18, бюл. №10.
5. Карякин В.Л. Пути развития региональных сетей России стандарта DVB-T2 // *Электросвязь*. 2021. № 3. С. 50–54.
6. Региональная сеть цифрового ТВ вещания стандарта DVB-T2 с наземными каналами связи: патент 2689793. Российская Федерация. № 2018128404 / В. Л. Карякин (RU), Д. В. Карякин (RU), Л.А. Морозова (RU); заявл. 03.08.18; опубл. 29.05.19, бюл. №16.
7. Карякин В.Л. Технология эксплуатации систем и сетей цифрового телевидения стандарта DVB-T2: монография, 2-е изд., переработанное и дополненное. М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2017. 384 с.
8. Карякин В.Л., Карякин Д.В. Техническая реализация метода измерения и калибровки задержек сигнала в модуляторах передатчиков стандарта DVB-T2 // *Электросвязь*. 2018. № 5. С. 22–25.
9. Digital Video Broadcasting (DVB); Implementation guidelines for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2). URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/102800_102899/102831/01.02.01_60/ts_102831v010201p.pdf (дата обращения: 06.05.2023).
10. Карякин В.Л., Карякин Д.В., Морозова Л.А. Метод измерения и калибровки задержек сигнала в модуляторах передатчиков стандарта DVB-T2 // *Электросвязь*. 2017. № 6. С.32–34.
11. Карякин В.Л. Инновационный путь решения проблемы сертификации передатчиков стандарта DVB-T2 в России // *Инфокоммуникационные технологии*. 2020. Т. 18, № 4. С. 456–464.
12. Карякин В.Л., Карякин Д.В., Морозова Л.А. Способ измерения результирующих временных задержек в модуляторах передатчиков с управляемой линией задержки и устройство для его осуществления: патент 2606208. Российская Федерация. № 2015106772 / В.Л. Карякин (RU), Д.В. Карякин (RU), Л.А. Морозова (RU); заявл. 26.02.15, опубл. 10.01.17, бюл. №1.
13. Карякин В.Л., Карякин Д.В., Морозова Л.А. Способы обеспечения работоспособности региональных синхронных сетей // *Электросвязь*. 2016. № 11. С. 30–35.
14. Синхронизация передатчиков одночастотной сети стандарта DVB-T2 / Д.А. Калиновский [и др.] // *Инфокоммуникационные технологии*. 2013. Т. 11, № 4. С. 86–90.
15. Karyakin V.L. Problems of Exploitation of the DVB-T2 Transmitters Standard in Russia // *International Conference on Engineering Management of Communication and Technology (EMCTECH)*. 2020. P. 1–6. DOI:10.1109/EMCTECH49634.2020.9261555
16. Karyakin V.L. Ways to Develop Regional DVB-T2 Standard Networks in Russia // *2021 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*. 2021. P. 9488332. DOI:10.1109/SYNCHROINFO51390.2021.9488332
17. Karyakin V.L. Algorithm for Implementing the Method of Increasing the Reliability of the Regional Digital TV Broadcasting Network // *2020 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*. 2020. P. 9166005. DOI:10.1109/SYNCHROINFO49631.2020.9166005
18. Sushko I.V., Karyakin V.L. Diagnostics of Sustainability of SFN Networks – The First Step to Solving the Problem of High-Quality TV Broadcasting In Russia // *2019 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*. 2019. P. 8814053. DOI:10.1109/SYNCHROINFO.2019.8814053
19. Способ оценки качества канала передачи данных в системе IPTV по коэффициенту BER в режиме ТВ вещания и устройство для его осуществления: патент 2595945. Российская Федерация. № 2015113424 / В.Л. Карякин (RU),

- Д.В. Карякин (RU), Л.А. Морозова (RU); за-
явл. 10.04.2015; опубл. 27.08.2016, бюл. 24.
20. Карякин В.Л. Цифровое телевидение: учеб.
пособие для вузов, 3-е изд., переработанное
и дополненное. М.: Солон-Пресс, 2020. 460 с.
21. Карякин В.Л. Региональная сеть цифрового
ТВ вещания стандарта DVB-T2 с наземными
каналами связи // Системы синхронизации,
формирования и обработки сигналов. 2019.
Т. 10, № 3. С. 42–45.
22. Методики субъективной оценки качества те-
левизионных изображений. Серия ВТ. Ради-
овещательная служба (телевизионная). URL:
https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-VT.500-14-201910-I!!PDF-R.pdf (дата об-
ращения: 20.06.2023).
23. Карякин В.Л., Карякин Д.В. Пути решения
проблемы обеспечения надежности беспере-
бойного телерадиовещания региональных се-
тей // Электросвязь. 2019. № 2. С. 45–49.
24. Karyakin V.L., Karyakin D.V. Distributed
DVB-T2 Standard Broadcast Quality
Monitoring System // 2022 Systems of Signals
Generating and Processing in the Field of on
Board Communications. 2022. P. 9744340.
DOI:10.1109/IEEECONF53456.2022.9744340
25. Карякин В.Л. Клиент-серверная система мо-
ниторинга качества ТВ-вещания в России // *Физика волновых процессов и радиотехниче-
ские системы*. 2022. Т. 25, № 3. С. 36–42.
26. Карякин В.Л. Пробное вещание SDR передат-
чика стандарта DVB-T2 // Телеграмм-канал.
URL: https://t.me/TV_VLK (дата обращения:
08.09.2023).

Получено 20.05.2023

Карякин Владимир Леонидович, д.т.н, профессор, профессор кафедры радиотехниче-
ских и электронных систем Поволжского государственного университета телекомму-
никаций и информатики, 443010, Российская Федерация, г. Самара, ул. Л. Толстого, 23,
Тел. +7 927 600-28-94. E-mail: vl@karyakin.ru

SYSTEM REQUIREMENTS FOR TELEVISION BROADCASTING EQUIPMENT IN RUSSIA

Karyakin V.L.

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

The operation of uncertified broadcasting equipment located in 85 regions of Russia is the most important problem in the development of regional broadcasting networks in the absence of system requirements for network transmitters and earth stations of satellite repeaters in the «Digital Broadcasting Television. System of terrestrial digital television broadcasting of the second generation DVB-T2. Second generation terrestrial digital television broadcasting system DVB-T2» domestic standard. Standard system requirements are the basis for actualization of requirements to the equipment during its certification. Requirements for network transmitters and earth stations of satellite repeaters in single-frequency broadcasting networks based on the author's research, published in domestic and foreign articles, protected by patents of the Russian Federation, are presented. In particular, the system requirements to the equipment for regional multiplex formation, metrological support of SFN (Single Frequency Network) operation and distributed system of DVB-T2 standard broadcasting quality monitoring are formulated. Requirements for assessing the efficiency of SFN networks, which will make it possible to further modernize existing regional networks to improve their reliability and the quality of television and radio broadcasting in all 85 regions of the Russian Federation, and to certify equipment in accordance with the resolution of the Government of the Russian Federation are also presented. The results of the author's research will make it possible to develop a system project for the creation of digital terrestrial television broadcasting in four new regions of Russia. The prospects for the development of DVB-T2 standard equipment at the program level are considered.

Keywords: *television broadcasting, system requirements, DVB-T2 standard, regional networks, multiplex, certification, system project*

DOI: 10.18469/ikt.2023.21.1.06

Karyakin Vladimir Leonidovich, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 23, L. Tolstoy Street, Samara, 443010, Russian Federation; Professor of Radio Electronic Systems Department, Doctor of Technical Science, Professor. Tel. +7 927 600-28-94. E-mail: vl@karyakin.ru

References

1. Karyakin V.L. Requirements for the operation of satellite earth stations and SFN network transmitters in Russia. *Elektrosvyaz'*, 2022, no. 5, pp. 43–48. (In Russ.)
2. Karyakin V.L. Requirements for operation of satellite earth stations and SFN transmitters. Telegram kanal. URL: https://t.me/TV_VLK (accessed: 08.09.2023). (In Russ.)
3. Karyakin V.L. Structural-parametric optimization of regional networks of digital broadcasting of the Russian Federation. *Sistemy sinkhronizatsii, formirovaniya i obrabotki signalov*, 2018, vol. 9, no. 1, pp. 80–84. (In Russ.)
4. Regional network of digital TV broadcasting of DVB-T2 standard: patent 2649415. Russian Federation. No. 2017112041 / V.L. Karyakin, D.V. Karyakin, L.A. Morozova; dec. 10.04.17; publ. 03.04.18, bul. no. 10. (In Russ.)
5. Karyakin V.L. Directions of development of regional networks of the DVB-T2 standard in Russia. *Elektrosvyaz'*, 2021, no. 3, pp. 50–54. (In Russ.)
6. Regional digital TV broadcasting network of DVB-T2 standard with terrestrial channels: patent 2689793. Russian Federation. No. 2018128404 / V.L. Karyakin, D.V. Karyakin, L.A. Morozova; dec.03.08.18; publ. 29.05.19, bul. no. 16. (In Russ.)
7. Karyakin V.L. *Technology of digital television systems and networks operation of DVB-T2 standard: Monograph*, 2th Ed., pererabotannoe i dopolnennoe. Moscow: Solon-Press, 2017, 384 p. (In Russ.)
8. Karyakin V.L., Karyakin D.V. Technical implementation of the method of measurement and calibration of signal delays in modulators of DVB-T2 transmitters. *Elektrosvyaz'*, 2018, no. 5, pp. 22–25. (In Russ.)
9. Digital Video Broadcasting (DVB); Implementation guidelines for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2). URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/102800_102899/102831/01.02.01_60/ts_102831v010201p.pdf (accessed: 06.05.2023).
10. Karyakin, V.L. Karyakin, D.V. Morozova L.A. Method of measurement and calibration of signal delays in modulators of DVB-T2 standard transmitters. *Elektrosvyaz'*, 2017, no. 6, pp. 32–34. (In Russ.)
11. Karyakin V.L. Innovative way to solve the problem of certification of DVB-T2 transmitters in Russia. *Infokommunikatsionnye tekhnologii*, 2020, vol. 18, no. 4, pp. 456–464. (In Russ.)
12. Method for measuring the resultant time delays in transmitter modulators with controllable delay line and a device for its implementation: patent 2606208. Russian Federation. No. 2015106772 / V.L. Karyakin, D.V. Karyakin, L.A. Morozova; dec. 26.02.15; publ. 10.01.17, bul. no. 1. (In Russ.)
13. Karyakin V.L., Karyakin D.V., Morozova L.A. Methods to ensure efficiency of regional synchronous networks. *Elektrosvyaz'*, 2016, no. 11, pp. 30–35. (In Russ.)
14. Kalinovskiy D.A., Karyakin V.L., Karyakin D.V., Sidorenko O.I. Synchronization transmitters SFN network standard DVB-T2. *Infokommunikatsionnye tekhnologii*, 2013, vol. 11, no. 4, pp. 86–90. (In Russ.)
15. Karyakin V.L. Problems of Exploitation of the DVB-T2 Transmitters Standard in Russia. *International Conference on Engineering Management of Communication and Technology (EMCTECH)*, 2020, pp. 1–6. DOI:10.1109/EMCTECH49634.2020.9261555
16. Karyakin V.L. Ways to Develop Regional DVB-T2 Standard Networks in Russia. *2021 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*, 2021, pp. 9488332. DOI:10.1109/SYNCHROINFO51390.2021.9488332

17. Karyakin V.L. Algorithm for Implementing the Method of Increasing the Reliability of the Regional Digital TV Broadcasting Network. *2020 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*, 2020, pp. 9166005. DOI:10.1109/SYNCHROINFO49631.2020.9166005
18. Sushko I.V., Karyakin V.L. Diagnostics of Sustainability of SFN Networks – The First Step to Solving the Problem of High-Quality TV Broadcasting In Russia. *2019 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*, 2019, pp. 8814053. DOI:10.1109/SYNCHROINFO.2019.8814053
19. Method of data channel quality assessment in IPTV system by BER coefficient in TV broadcasting mode and device for its implementation: patent 259594. Russian Federation. No. 2015113424 / V.L. Karyakin, D.V. Karyakin, L.A. Morozova; dec. 10.04.2015; publ. 27.08.2016, bul. no. 24. (In Russ.)
20. Karyakin, V.L. *Digital television: Textbook for Universities*, 3-e izd., pererabotannoe i dopolnennoe. Moscow: Solon-Press, 2020, 460 p. (In Russ.)
21. Karyakin, V.L. Regional digital TV broadcasting network of DVB-T2 standard with terrestrial communication channels. *Sistemy sinkhronizatsii, formirovaniya i obrabotki signalov*, 2019, vol. 10, no. 3, pp. 42–45. (In Russ.)
22. Methods for subjective assessment of the quality of television images. Seriya BT. Radioveshchatel'naya sluzhba (televizionnaya). URL: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.500-14-201910-I!!PDF-R.pdf (accessed: 20.06.2023). (In Russ.)
23. Karyakin V.L., Karyakin D.V. Ways to solve the problem of ensuring reliability of uninterrupted TV broadcasting of regional networks. *Elektrosvyaz'*, 2019, no. 2, pp. 45–49. (In Russ.)
24. Karyakin V.L., Karyakin D.V. Distributed DVB-T2 Standard Broadcast Quality Monitoring System. *Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*, 2022, pp. 9744340. DOI:10.1109/IEEECONF53456.2022.9744340 (In Russ.)
25. Karyakin V.L. Client-server system for monitoring the quality of TV broadcasting in Russia. *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, 2022, vol. 25, no. 3, pp. 36–42. (In Russ.)
26. Karjakin V.L. Trial broadcasting of SDR transmitter of DVB-T2 standard. Telegram kanal, 2023. URL: https://t.me/TV_VLK (accessed: 08.09.2023). (In Russ.)

Received 20.05.2023

УДК 004.75

ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА МЕСТ РАЗМЕЩЕНИЯ РЕТРАНСЛЯТОРОВ СИСТЕМ БЕЗОПАСНОСТИ НА МЕСТНОСТИ С ПРЕПЯТСТВИЯМИ

*Старцев Д.Ю., Логинов И.В., Сосунов В.Г., Плыгунов О.В.
Академия федеральной службы охраны России, Орел, РФ
E-mail: loginov_iv@bk.ru*

При развертывании временных технических систем безопасности в интересах обеспечения общественной безопасности при проведении массовых мероприятий широко используют быстроразвертываемые датчики обнаружения опасных событий: наблюдения за транспортными потоками и посетителями, обнаружение возгораний, драк, агрессивного поведения, опасных оставленных предметов, беспилотных летательных аппаратов. Ряд важных ограничений, среди которых геометрические размеры зон установки детекторов и ретрансляторов, пропускные способности каналов передачи данных, наличие запретных зон и высокая скорость передачи данных от современных датчиков опасных событий показывает необходимость рационального размещения ретрансляторов. В рамках решения этой задачи предложен алгоритм расчета мест размещения ретрансляторов на местности с препятствиями. Итеративный алгоритм расчета мест размещения позволяет найти точки установки ретрансляторов для обеспечения передачи высокоскоростных потоков данных мониторинга.

Ключевые слова: ретранслятор, метод, положение, координаты, расстояние, система безопасности, радиосвязь, информационный поток, детектор

Введение

При проведении массовых мероприятий с большим количеством людей на различных объектах, слабо оборудованных, либо совсем не оборудованных стационарными техническими средствами обеспечения безопасности и соблюдения правопорядка (городские площади, парки, стадионы и др.), возникает необходимость в развертывании временных технических систем безопасности. Для этих целей широко используются быстроразвертываемые детекторы обнаружения опасных событий, позволяющие: осуществлять наблюдение за транспортными потоками и посетителями; обнаруживать возгорания, драки, агрессивное поведение, опасные предметы, оставленные без присмотра, изменения химического и радиационного фона, беспилотные летательные аппараты и др. Передача информации от таких датчиков в центр управления безопасностью осуществляется по радиоканалу, при этом скорость передачи данных от одного датчика может достигать 10-30 мбит/с. В связи с этим возникает необходимость обеспечения непрерывной надежной радиосвязи для гарантированного получения сигналов наблюдения и тревожных событий, что приводит к необходимости развертывания сети радиосвязи, включающей в свой состав значительное число ретрансляторов [1].

Наличие ряда важных ограничений, основными из которых являются: геометрические размеры зоны размещения детекторов; пропускные способности каналов связи; наличие запретных зон размещения и высокая скорость передачи данных от современных датчиков обуславливает необходимость рационального размещения ретрансляторов при развертывании временных технических систем безопасности. При этом, единого решения, которое бы учитывало, как характеристики датчиков, так и параметры системы передачи данных для условий высокой закрытости местности в настоящий момент не разработано, что показывает актуальность разработки численных методов размещения ретрансляторов систем безопасности на местности.

Формальная постановка задачи размещения ретрансляторов на местности

Исходными данными для решения задачи размещения ретрансляторов технической системы безопасности на местности выступает план временно развертываемой технической системы безопасности [2]. План системы на местности разрабатывается заранее. Указываются места

размещения высокоскоростных детекторов с точностью не менее 0,1 м. В общем случае известно следующее (пример – рисунок 1):

- множество строений (сооружений). Они представляют собой препятствия для распространения сигнала и запретные места для расстановки ретрансляторов передачи данных. Моделируются множеством многоугольников с характеристиками ослабления сигнала (определяется типом сооружения):

$$Z = \{z_j\}, z_j = \langle \{p_1, \dots, p_{j_i}, \dots, p_{I(z_j)}\}, \gamma \rangle,$$

где z_j – препятствие, p_{ji} – вершина многоугольника (препятствия), γ – коэффициент ослабления радиосигнала в препятствии;

- множество запретных зон размещения ретрансляторов, задаваемых многоугольниками: $ZD = \{zd_j\}$, $zd_j = \langle \{p_1, \dots, p_{j_i}, \dots, p_{I(zd_j)}\} \rangle$, где zd_j – j -я запретная зона, $p_i = \langle x_i, y_i \rangle$ – координаты вершины многоугольника запретной зоны, I – количество вершин многоугольника;

- множество высокоскоростных датчиков и их отображение на карте (плане): $D = \{d_j\}$, где d_j – высокоскоростной датчик: $d_j = \langle c_j, p_j \rangle$, характеризующийся c_j – потоком данных с датчика ($c_d \approx 2..10$ Мбит/с), и $p_j = \langle x_j, y_j \rangle$ – координатами места размещения датчика;

- множество доступных ретрансляторов: $Rs = \{rs_i\}$, где $rs_i = \langle P, D \rangle$, где P – мощность передатчика, D – характеристики диаграммы направленности антенны.

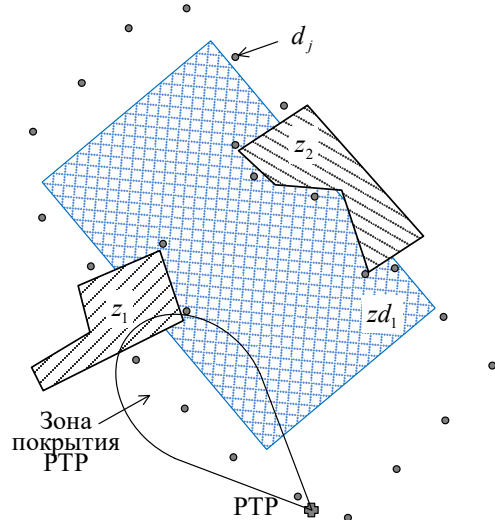


Рисунок 1. Пример исходных данных

Найти:

- подмножество установленных ретрансляторов $RsP \subseteq Rs$, где $rsP = \langle rs, p, Az \rangle$, Az – направление (азимут) ретранслятора, $p = \langle x_i, y_i \rangle$ – координаты ретранслятора.

При выполнении следующего ограничения на размещение ретрансляторов:

$\|RsP\| \rightarrow \min$ при ограничении:

$$C_{km}^R (RSSI = \min RSSI_{kjm}) \geq C_{km}^{ND},$$

где $C_{km}^R = C(RSSI)$ – максимальная пропускная способность k -го ретранслятора,

$$C_{ikm}^{ND} = \sum_{j=1}^{N_{ikm}^D} c_{ij}, d_{ij} \in D_{ikm} \text{ – суммарный поток пе-}$$

редачи данных от всех высокоскоростных датчиков, подключенных к k -му ретранслятору rsP_k (РТР).

Обзор подходов к решению задачи размещения объектов на местности

Общую постановку задачи на построение временно развертываемой системы безопасности и наблюдения и решение задачи оптимального размещения детекторов на местности рассматривали многие авторы: разработан алгоритм автоматизированного проектирования системы видеонаблюдения [3], эвристический алгоритм размещения, основанный на использовании диаграммы Вороного, покрывающий замкнутый многоугольник без дыр [4], эвристика замощения пространства геометрическими фигурами детектирования [2], в [5] решает задачу оптимизации размещения двумерных геометрических объектов на анизотропном материале с использованием методов математического программирования.

Известны исследования посвященные оптимизации размещения беспроводных терминалов [6–9]. В [6] рассматривается задача перепроектирования беспроводных сетей при изменении внешних условий на основе методов машинного обучения. В [10] рассмотрено размещение датчиков температуры. В [7] предлагаются основанные на UWB коммуникационные протоколы для расчета местоположения беспроводных сенсоров. Применяется метод, основанный на ортогональном переменном коэффициенте распространения и скачке времени, методе оценки максимального правдоподобия для вычисления расстояний до опорных сенсоров, учитывающий координаты подвижных сенсоров с использованием метода наименьших квадратов. В [8] предлагается новый алгоритм, позволяющий точно находить лучшие местоположения беспроводных датчиков при минимизации средней потребляемой энергии в сети. Оптимизация проводится по критериям стоимости и качества связи.

Задача размещения объектов на местности с ограничениями может быть представлена как за-

дача покрытия многоугольника с препятствиями некоторыми фигурами (для ретранслятора это область одного уровня сигнала с заданной гарантированной пропускной способностью). Указанного рода задачи нашли распространение в нескольких отраслях науки и техники: в астрономических исследованиях решается задача покрытия кругами плоскости; в системах видеонаблюдения решается задача покрытия треугольниками или секторами; в системах транспортного мониторинга рассматривается задача покрытия территории кругами областей действия RFID-считывателей; для химических исследований используется задача покрытия шарами заданной трехмерной области; при строительстве дорог используется покрытие плоскостей плитами различной геометрической формы; в системах виртуальной реальности решают задачи генерации карт вейпоинтов [11]. Общие классы решения задач данного вида включают [12]:

- задачи компоновки объектов в контейнеры (двух и трехмерные) [13]: элементов печатных плат, грузов, коробок, товаров [14; 15];

- задачи оптимального раскрытия материалов, решаемые в машиностроении, текстильной и авиастроительной промышленности, при этом заготовки могут быть произвольной формы;

- задачи распределения ограниченных ресурсов различных типов: память вычислительных машин, участки полей и лесов [16].

Все рассмотренные выше классы задач относятся к задачам оптимизационного геометрического моделирования, заключающегося в оптимизации размещения объектов произвольных измерений в заранее заданных областях [17–21]. При этом в известных решениях не показано использование покрытия области фигурами, имеющими вид диаграмм направленности антенн с учетом ограничения количества устройств и мест их размещения.

Модель ретранслятора

Во временно развертываемых системах безопасности используются сети связи, организованные на основе технологий Wi-Fi, WiMAX, 3G, 4G, 5G. В работе, независимо от общности рассматриваемых вопросов размещения ретрансляторов, дальнейшие рассуждения приведены для технологии Wi-Fi, которая позволяет обеспечить передачу данных со скоростью 1000 – 50 Мбит/с на расстояние до 100-300 м.

Технология IEEE 802.11 (Wi-Fi). Для построения беспроводных сетей, как правило, применяют беспроводные клиентские устройства (адаптеры), точки доступа, беспроводные маршрутизаторы, повторители, мосты и антенны.

Исходные данные для решения поставленной задачи целесообразно разделить на две группы – данные, позволяющие определить минимально необходимый уровень мощности сигнала на входе датчика для обеспечения радиосвязи, и план временно развертываемой технической системы безопасности.

С точки зрения расстановки ретрансляторов необходимо учитывать, что распространение радиоволн в сложных условиях связаны с явлениями многолучевости, обусловленной многократными отражениями радиоволн от стен и объектов, а также дифракцию на многочисленных острых краях предметов и рассеяние при столкновении радиоволн с препятствием соизмеримым с длиной волны. Данные эффекты обуславливают сложную структуру электромагнитного поля. Поэтому в каналах беспроводной связи возникают затухания сигналов двух типов – крупномасштабное и мелкомасштабное.

Крупномасштабное затухание показывает среднее ослабление мощности сигнала из-за распространения на расстояние, определяется наличием вдоль траектории распространения таких объектов как: строения, растительность, рекламные щиты, стены, двери, перекрытия зданий и т. д. Таким образом, потери на пути распространения радиосигнала при крупномасштабном затухании можно рассчитать, как функцию от расстояния. В этом случае мощность принимаемого сигнала уменьшается с расстоянием по степенному закону, а отклонения от среднего значения определяются логарифмически нормальным распределением [22].

Мелкомасштабное затухание обусловлено вариациями амплитуды и фазы сигнала, и проявляется как расширение сигнала во времени и нестационарное поведение частотного канала связи. В системах беспроводной связи параметры канала изменяются во времени, в том числе и из-за движения передатчика или приемника. Мелкомасштабное затухание называется релеевским, если прямая видимость между передатчиком и приемником отсутствует, а сигнал в точку приема приходит в результате многократных отражений от различных объектов. Огибающая такого сигнала моделируется релеевской функцией плотности вероятности. Преобладание прямой видимости при распространении сигнала позволяет описать огибающую мелкомасштабного затухания функцией плотности вероятности вида Райса. Этот вид затухания вносит значительный вклад в затухание в каналах мобильной связи из-за того, что распространение сигнала происходит на большие расстояния. В случае же распростране-

ния Wi-Fi сигнала на незначительных территориях этим видом затухания можно пренебречь, обеспечив на линии некоторый энергетический запас. Таким образом, при решении поставленной задачи представляет интерес не вычисление точной интенсивности (ослабления) сигнала, а некоторая его оценка, ввиду сложности учета деталей строений и, следовательно, всех особенностей мелкомасштабного затухания.

С учетом сказанного для определения величины крупномасштабного затухания воспользуемся известной формулой:

$$L = 20 \cdot X \cdot \lg \left(\frac{4\pi df}{c} \right),$$

где X – коэффициент ослабления, равный 1 для открытого пространства, d – расстояние до детектора, f – частота радиосигнала, c – скорость света.

При этом минимально необходимое значение уровня принимаемого сигнала датчика во многом определяется передающей и приемной антеннами.

Типовая диаграмма направленности наиболее распространенных антенн, используемых для передачи сигнала по радиоканалу, представлена на рисунке (рисунок 2).

Исходя из вышеизложенного, для решения поставленной задачи с учетом известных потерь (L), коэффициентов усиления передающей и приемной антенн (G_1, G_2) и мощности передачи точки доступа (P_1) можно определить минимально необходимый уровень мощности принимаемого сигнала ($RSSI$):

$$RSSI = P_1 \cdot G_1 \cdot G_2 \cdot L.$$

При этом следует полагать, что потери в фидере для точки доступа будут незначительны, и их можно не учитывать, а в целях устойчивого функционирования радиолинии следует ввести запас уровня сигнала на входе приемника.

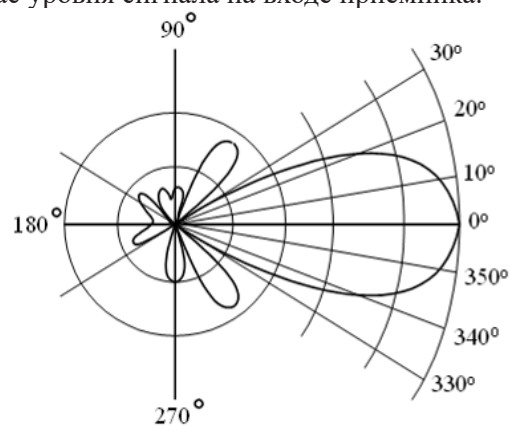


Рисунок 2. Типовая диаграмма направленности антенн

В общем случае пропускная способность радиоканала от датчика до ретранслятора определяется модуляцией и кодированием сигнала (рисунок 3) и зависит от наличия прямой видимости, мощности передаваемого сигнала, используемого диапазона частот, коэффициента усиления антенны и количества информационных потоков, а также от вида используемой модуляции. Значение пропускной способности ретранслятора может быть представлено в виде функции от уровня сигнала в точке наихудшего приема сигнала (определяется таблично в зависимости от технологии передачи данных:

$$C_{km}^R = C(RSSI).$$

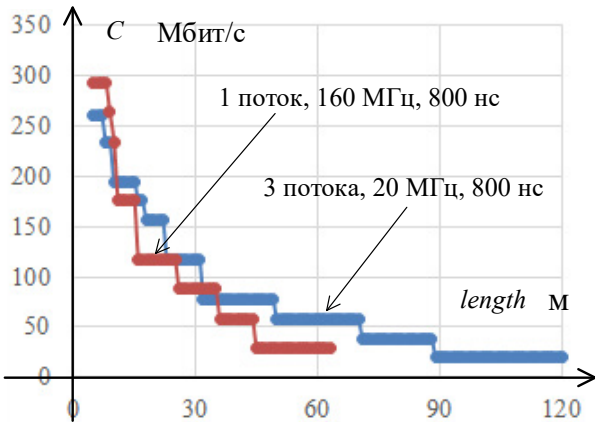


Рисунок 3. Пропускная способность от дальности до точки для Wi-Fi 802.11n/ac

В соответствии с рекомендацией МСЭ-R М.1851-1 примером диаграммы направленности может служить косинус-квадратная антенна со следующими характеристиками:

- относительная форма распределения поля:

$$f(\alpha) = \cos^2(\pi \cdot \alpha / 2);$$

- диаграмма направленности:

$$F(\mu) = \frac{\pi^2}{2\mu} \left[\frac{\sin \mu}{\pi^2 - \mu^2} \right],$$

где $\mu = \frac{\pi \cdot 83,2 \cdot \sin \theta}{\theta_3}$, θ_3 – ширина луча по уровню половинной мощности сигнала, θ – направление на рассматриваемую точку.

В качестве приемной антенны целесообразно использовать штыревую антенну, коэффициент усиления которой составляет порядка 2–3 дБ.

Алгоритм расчета мест размещения ретрансляторов

Алгоритм определения мест размещения ретрансляторов представлен на рисунке 3. На первом шаге определяется минимальное количество ре-

трансляторов с учетом совокупного потока данных от всех детекторов к k-му ретранслятору rsP_k :

$$C_{ikm}^D = \sum_{j=1}^{N_{ikm}^D} c_{ij}, c_{ij} \in D_{ikm},$$

При этом все множество детекторов разбивается на равные по размеру подмножества D_k таким образом, чтобы расстоянием между двумя наиболее удаленными детекторами для каждого подмножества было минимальным:

$$D = \bigcup_{k=1}^{N^R} D_k,$$

где D_k – k-е подмножество детекторов ND_i ,

$$\max_{D_k} \text{length}(d_i, d_j) \rightarrow \min,$$

$\text{length}(d_i, d_j)$ – смещенное на диаграмму направленности антенны евклидово расстояние между двумя детекторами:

$$\text{length}(d_i, d_j) = \frac{\sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2}}{f(\alpha)}$$

Начальное количество ретрансляторов рассчитывается по формуле:

$$N_R = \lceil C_{ik}^D / C(RSSI(\max \text{length}(ND))) \rceil.$$

С использованием алгоритма (рисунок 4) формируется исходное (новое) размещение ретрансляторов: $Rs_{im} = \{rs_j\}_{im}$.

Для нового размещения ретрансляторов генерируется новое m-е разбиение подмножества детекторов D_k :

$$D_{im} = \bigcup_{k=1}^{N^R} D_{ikm}.$$

Рассчитывается пропускная способность ретранслятора $C_{km}^R = C(RSSI)$ на основе значения $RSSI(d_{ikm})$ всех детекторов, замкнутых на i-й ретранслятор.

По всем сравниваются значения необходимой и имеющейся пропускной способности и проверяется условие:

$$\forall rsP_i \in RsP_{im} : C_{ikm}^R > C_{ikm}^D. \quad (1)$$

При выполнении условия (1) работа алгоритма завершается, в противном случае генерируется новое размещение путем сдвига координат ретрансляторов против градиента (рисунок 6). При расчете новой пропускной способности сети передачи данных рассчитывается нехватка пропускной способности:

$$\Delta C = C_{km}^R - C_{km}^{ND},$$

которое сравнивается с потоком данных от одного детектора $\varepsilon_c = \bar{c}_{ij}$. При нехватке ресурса добавляется дополнительный ретранслятор и генерируется новое размещение.

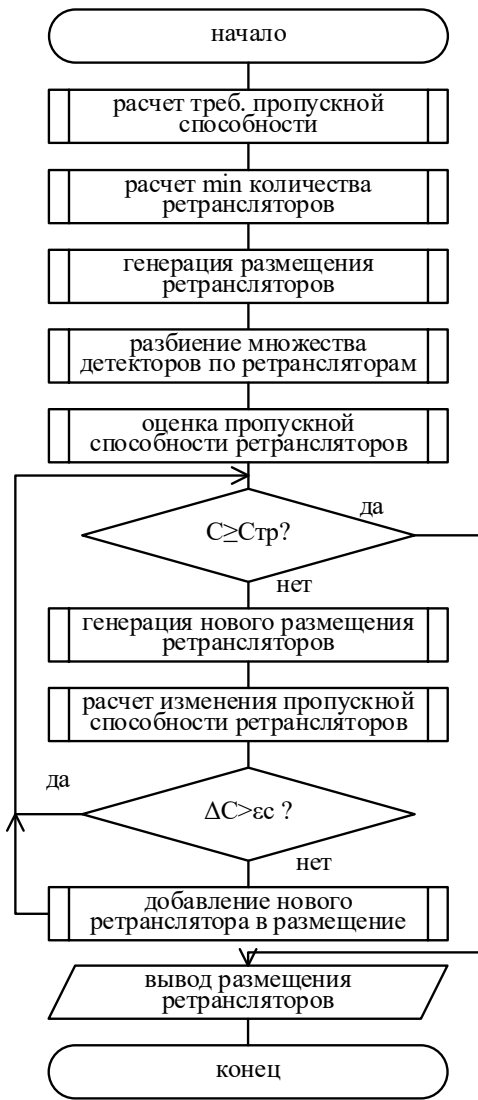


Рисунок 4. Блок-схема алгоритма расчета мест размещения ретрансляторов

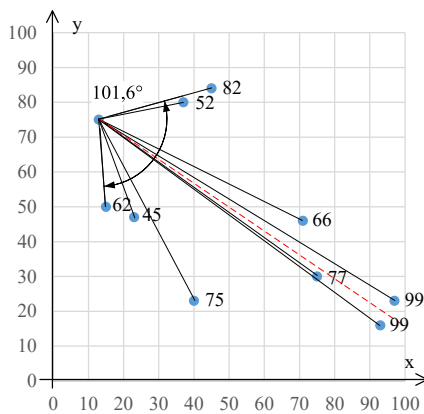


Рисунок 5. Иллюстрация расчета смещенного расстояния (n=10)

Пример нахождения смещенного на диаграмму направленности антенны евклидова расстояния между детекторами приведен на рисунке 5. Задано 10 детекторов, с одним из них совмеща-

ется ретранслятор, и рассчитывается значение функции $length(d_i, d_j)$ для всех детекторов.

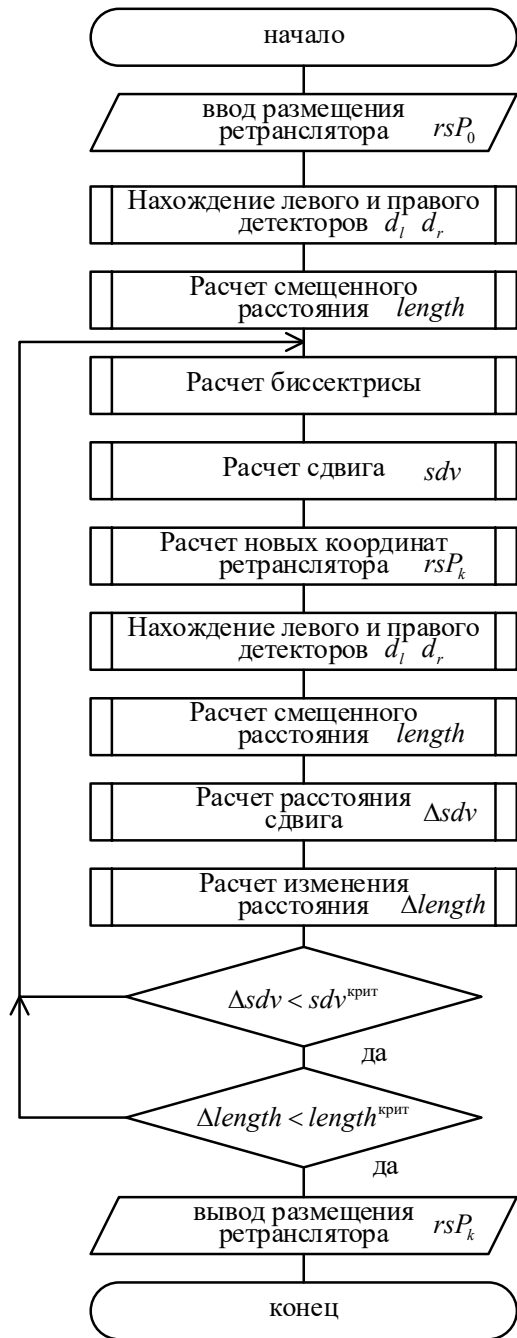


Рисунок 6. Итеративный алгоритм нахождения местоположения ретранслятора

Итеративный алгоритм нахождения рационального местоположения ретранслятора приведен на рисунке 6.

Исходные данные:

$rsP = \{x_0; y_0\}$ – точка местоположения ретранслятора;

$D_k = \bigcup_{j=1}^{|D_k|} d_j$ – множество детекторов, подсоединенных к ретранслятору.

Найти: $rsP_k = \{x_{0,k}; y_{0,k}\}$ – точку размещения ретранслятора, такую, что $\max_D length(rsP_k, d_j) \rightarrow \min$.

Основная идея алгоритма – использование градиентного метода оптимизации. Первоначальная величина сдвига равна 1/10 от евклидова расстояния до детектора. При возрастании текущего значения смещенного расстояния, величина сдвига уменьшается в два раза. При попадании в препятствие (запретную зону) – сдвиг выполняется по границе запретной зоны в сторону убывания смещенного расстояния.

Критерий останова: сдвиг меньше 0,1 м или изменение смещенного расстояния меньше 1 (определяются точностью позиционирования ретранслятора на местности).

Пример: исходное положение детекторов приведено на рисунке 5. Начальное расположение ретранслятора совпадает с детектором: $d = \{40; 23\}$. Итоговое расположение ретранслятора после 16 итераций: $d = \{13; -8\}$.

Вычислительная сложность и сходимость алгоритма: количество итераций основного алгоритма (рисунок 4) не превышает количества детекторов, количество итераций алгоритма размещения ретранслятора (рисунок 6) на практике составляло 30-70. Все расчеты имеют линейную сложность, соответственно, худший случай квадратично завит от числа детекторов.

Пример расчета мест размещения ретрансляторов

Для автоматизации подготовки данных по расстановке ретрансляторов разработано программное средство, позволяющее для заданных исходных данных (местоположения детекторов и интенсивности информационных потоков) рассчитывать местоположение ретрансляторов с учетом зон видимости.

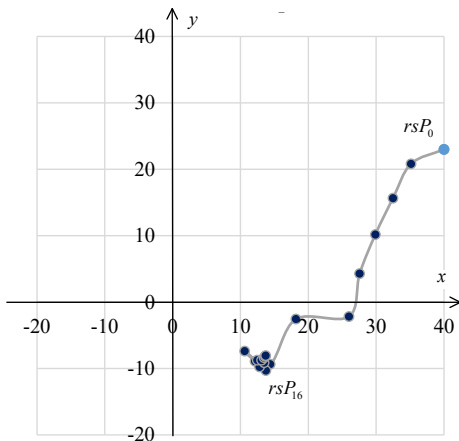


Рисунок 7. Иллюстрация итеративного изменения координат ретранслятора

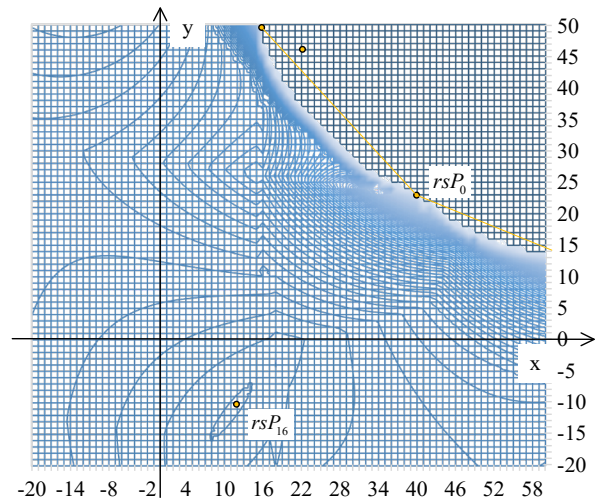


Рисунок 8. Значения целевой функции $\max_D length(rsP_k, d_j)$

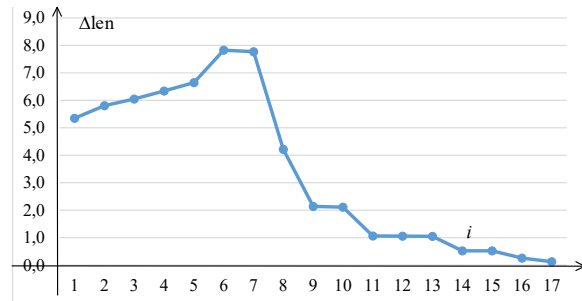


Рисунок 9. Изменение величины сдвига от итерации алгоритма

Вариант расчета местоположения ретрансляторов приведен на рисунке 11 и 12.

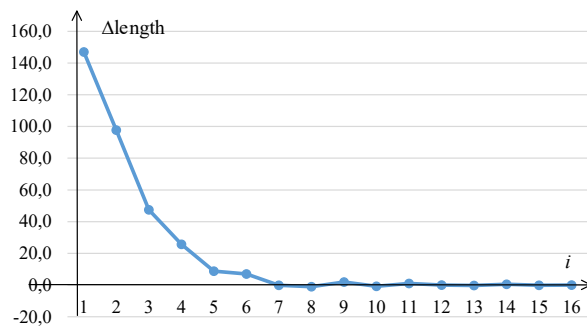


Рисунок 10. Изменение величины смещенного расстояния от итерации алгоритма

Вариант 2 расчета местоположения ретрансляторов приведен на рисунке 3 (режим 2).

Результаты выполненных с использованием алгоритма (рисунок 4) расчетов для различных исходных данных показали возможность нахождения минимального количества ретрансляторов и мест их установки для заданной конфигурации высокоскоростных датчиков.

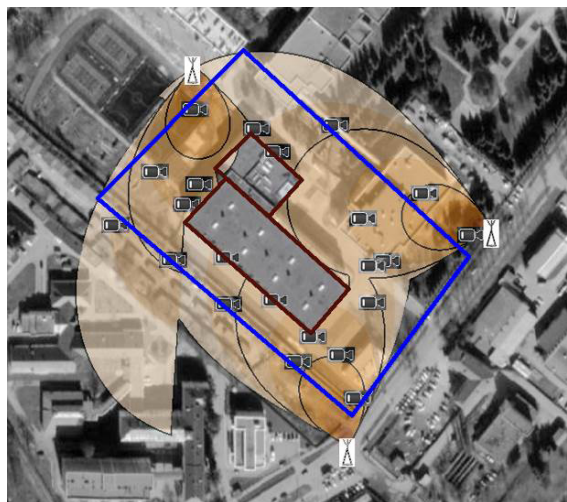


Рисунок 11. Пример размещения ретрансляторов (22 детектора, 3 ретранслятора)



Рисунок 12. Пример размещения ретрансляторов (17 детекторов, 5 ретрансляторов)

Заключение

В работе рассмотрена проблема обеспечения непрерывной надежной радиосвязи для получения сигналов наблюдения и тревожных событий во временно развертываемых системах безопасности. В рамках решения этой задачи предложен алгоритм расчета мест размещения ретрансляторов на местности с препятствиями. Итеративный алгоритм расчета мест размещения позволяет найти точки установки ретрансляторов для обеспечения передачи высокоскоростных потоков информации мониторинга.

Литература

1. Логинов И.В., Старцев Д.Ю., Саламатов С.К. Оптимальное размещение сети видеокамер с радиоканалом в быстровозводимых системах мониторинга и охраны объектов // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2021. № 5–6 (155–156). С. 105–112.
2. Логинов И.В., Старцев Д.Ю. Алгоритм оптимального размещения беспроводных видеосенсоров в быстровозводимых системах мониторинга и охраны объектов // Информационные системы и технологии. 2021. № 5 (127). С. 39–49.
3. Лукоянов С.В., Белов С.В. Процедура рационального расположения камер видеонаблюдения в составе системы контроля и управления доступом // Вестник Архангельского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2012. № 2. С. 82–87.
4. Воронов А.А. Метод покрытия прямоугольниками объектов топологии микросхем, основанный на использовании обобщенной диаграммы Вороного // Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси. 2009. № 3. С. 367–375.
5. Петренко С.В. Оптимизация размещения двумерных геометрических объектов на анизотропном материале с использованием методов математического программирования: дис. ... канд. техн. Уфа, 2005. 115 С.
6. Machine Learning in Wireless Sensor Networks: Algorithms, Strategies, and Applications / M.A. Alsheikh [et.al.] // IEEE Communications Surveys and Tutorials. 2014. Vol. 16, no. 4. P. 1996–2018.
7. Di W.U., Lichun B.A. O., Renfa L.I. UWB-Based Localization in Wireless Sensor Networks // Communications, Network and System Sciences. 2009. no. 5. P. 407–421.
8. Ouchitachen H., Hair A., Idrissi N. Optimal Placement of Sensors in Mission-specific Mobile Sensor Networks // TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering. 2015. Vol. 16, no. 1. P. 191–199.
9. Reddy G.P., Gerardine M. Optimal node placement in wireless sensor networks // International Journal of Engineering Science and Technology. 2011. Vol. 3, no. 2. P. 1124–1129.
10. Gongsheng H., Pei Zh., Linfeng Zh. Optimal Location of Wireless Temperature Sensor Nodes in Large-scale Rooms // 13th international conference on indoor air quality and climate, indoor air. 2014. P. 895–902. DOI: 10.13140/RG.2.1.1897.2884.
11. Сафонов А.А., Панфилов А.Н. Применение алгоритмов геометрического покрытия для решения задачи размещения RFID-оборудо-

- вания // Вестник молодежной науки России. 2019. № 2. С. 39.
12. Забелин С.Л., Фроловский В.Д. Разработка и исследование моделей, методов и алгоритмов для синтеза и анализа решений задач геометрического покрытия // Вестник Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики. 2013. № 2. С. 42–53.
 13. Курейчик В.В., Глущенко А.Е. Многоуровневый подход для решения задачи трехмерной упаковки большой размерности // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2020. № 2 (212). С. 6–16.
 14. Валеева А.Ф., Тоцков И.Е. Решение задачи трехмерной упаковки // Комплексный анализ, дифференциальные уравнения, численные методы и приложения: материалы международной конференции. Уфа: ИМВЦ УНЦ РАН, 1996. С. 30–36.
 15. Верхотуров М.А., Верхотурова Г.Н. О задаче трехмерной упаковки объектов сложных геометрических форм // Роль геометрии в искусственном интеллекте и системах автоматизированного проектирования: материалы всероссийской научно-технической конференции. Улан-Удэ, 1996. С. 43–45.
 16. Гиль Н.И. Математическое моделирование нерегулярного размещения плоских геометрических объектов в системах автоматизации проектирования (теоретические основы, методы, приложения): автореф. ... дис. тех. наук. Минск, 1990. С. 32.
 17. Стоян Ю.Г., Яковлев С.В. Математические модели и оптимизационные методы геометрического проектирования. Киев: Наукова думка, 1986. С. 286.
 18. Dyckhoff H. A typology of cutting and packing problems // European Journal of Operational Research. 1991. no. 44. P. 145–159.
 19. Gilmore P.C., Gomory R.E. A linear programming approach to the cutting stock problem // Operation Research. 1961. Vol. 9, no. 6. P. 849–859.
 20. Хасанов Р.И., Дямина Э.И. Математическое и программное обеспечение размещения ортогональных объектов в многоугольной области на базе матричной технологии // Молодежный вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2019. № 1 (20). С. 183–186.
 21. Sun Ya., Halgamuge S. Minimum-Cost Heterogeneous Node Placement in Wireless Sensor Networks // IEEE Access. 2019. Vol.7. P.17847–17858. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2894117
 22. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. 2-е изд., исправленное. М.: Издательство Вильямс, 2007. 1104 с.

Получено 11.07.2023

Старцев Дмитрий Юрьевич, сотрудник Академии Федеральной службы охраны Российской Федерации (ФГКБОУ ВО). 302015, Российская Федерация, г. Орел, ул. Приборостроительная, 35. Тел. +7 910 266-66-48. E-mail: starcev_d@mail.ru

Логинов Илья Валентинович, сотрудник ФГКБОУ ВО. 302015, Российская Федерация, г. Орел, ул. Приборостроительная, 35. Тел. +7 910 303-80-60. E-mail: loginov_iv@bk.ru

Сосунов Владимир Геннадьевич, сотрудник ФГКБОУ ВО. 302015, Российская Федерация, г. Орел, ул. Приборостроительная, 35. Тел. +7 903 880-48-09. E-mail: vlsosunov@mail.ru

Плыгунов Олег Вячеславович, сотрудник ФГКБОУ ВО. 302015, Российская Федерация, г. Орел, ул. Приборостроительная, 35. Тел. +7 910 303-80-60.

NUMERICAL METHOD FOR CALCULATING THE LOCATIONS OF SAFETY SYSTEM REPEATERS ON TERRAIN WITH OBSTACLES

Startsev D.U., Loginov I.V., Sosunov V.G., Plygunov O.V.

Academy of the Federal Guard Service of the Russian Federation, Oryol, Russian Federation

E-mail: loginov_iv@bk.ru

When deploying temporary technical security systems in the interests of ensuring public safety during mass events, quick-deployable sensors for detecting dangerous events are widely used: to monitor traffic flows and visitors, to detect fires, fights, aggressive behavior, dangerous abandoned objects and unmanned aerial vehicles. A number of important limitations, including geometric dimensions of the

detector and repeater installation areas, the capacity of data transmission channels, the presence of restricted areas and the high speed of data transmission from modern sensors of dangerous events, show the need for rational location of repeaters. An iterative algorithm used to estimate placement locations provides an opportunity to find repeater installation points in order to ensure the transmission of high-speed monitoring information flows.

Keywords: *repeater, method, location, coordinates, distance, security system, radio communication, information flow, detector*

DOI: 10.18469/ikt.2023.21.1.07

Startsev Dmitry Yuryevich, Academy of the Federal Guard Service of the Russian Federation, 35, Priborostroitelnaya Street, Orel, 302015, Russian Federation; Employee. Tel. +7 910 266-66-48. E-mail: starcev_d@mail.ru

Loginov Ilya Valentinovich, Academy of the Federal Guard Service of the Russian Federation, 35, Priborostroitelnaya Street, Orel, 302015, Russian Federation; Employee. Tel. +7 910 303-80-60. E-mail: loginov_iv@bk.ru

Sosunov Vladimir Gennadievich, Academy of the Federal Guard Service of the Russian Federation, 35, Priborostroitelnaya Street, Orel, 302015, Russian Federation; Employee. Tel. +7 903 880-48-09. E-mail: vlsosunov@mail.ru

Plygunov Oleg Vyacheslavovich, Academy of the Federal Guard Service of the Russian Federation, 35, Priborostroitelnaya Street, Orel, 302015, Russian Federation; Employee. Tel. +7 910 303-80-60.

References

1. Loginov I.V., Startsev D.Yu., Salamatov S.K. Optimal placement of video cameras with radio channel network in fast development facilities monitoring and physical protection systems. *Voprosy oboronnoj tehniki. Seriya 16: Tehnicheskie sredstva protivodejstvija terrorizmu*, 2021, no. 5–6 (155–156), pp. 105–112. (In Russ.)
2. Loginov I.V., Startsev D.Yu. Algorithm for optimal placement of wireless video sensors in fast development facilities monitoring and physical protection systems. *Informacionnye sistemy i tehnologii*, 2021, no. 5 (127), pp. 39–49. (In Russ.)
3. Lukoyanov S.V., Belov S.V. Procedure for the rational location of video surveillance cameras as part of the access control and management system. *Vestnik Astrahanskogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika*, 2012, no. 2, pp. 82–87. (In Russ.)
4. Voronov A.A. Method of covering objects of micro-circuit topology with straight angles based on the use of a generalized Voronoi diagram. *Ob"edinennyj institut problem informatiki NAN Belarusi*, 2009, no. 3, pp. 367–375. (In Russ.)
5. Petrenko S.V. Optimization of placement of two-dimensional geometric objects on anisotropic material using mathematical programming methods: diss. ... cand. tech. sciences. Ufa, 2005, 115 p. (In Russ.)
6. Alsheikh M.A. et al. Machine Learning in Wireless Sensor Networks: Algorithms, Strategies, and Applications. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 2014, vol. 16, no. 4, pp. 1996–2018.
7. Wu D., Bao L., Li R. UWB-Based Localization in Wireless Sensor Networks. *Communications, Network and System Sciences*, 2009, no. 5, pp. 407–421.
8. Ouchitachen H., Hair A., Idrissi N. Optimal Placement of Sensors in Mission-specific Mobile Sensor Networks. *TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering*, 2015, vol. 16, no. 1, pp. 191–199.
9. Reddy G.P., Gerardine M. Optimal node placement in wireless sensor networks. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 2011, vol. 3, no. 2, pp. 1124–1129.
10. Gongsheng H., Pei Zh., Linfeng Zh. Optimal Location of Wireless Temperature Sensor Nodes

- in Large-scale Rooms. 13th *International conference on indoor air quality and climate, indoor air*, 2014, pp. 895–902. DOI: 10.13140/RG.2.1.1897.2884
11. Safonov A.A., Panfilov A.N. Application of geometric coverage algorithms for solving the problem of RFID equipment placement. *Vestnik molodjozhnoj nauki Rossii*, 2019, no. 2, pp. 39. (In Russ.)
 12. Zabelin S.L., Frolovsky V.D. Development and research of models, methods and algorithms for synthesis and analysis of solutions to geometric coating problems. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta telekommunikacij informatiki*. Novosibirsk, 2013, no 2, pp. 42–53. (In Russ.)
 13. Kureychik V.V., Glushchenko A.E. Multilevel approach for high dimensional 3D packing problem. *Izvestiya YUzhnogo federal'nogo universiteta. Tehnicheskie nauki*, 2020, no. 2 (212), pp. 6–16. (In Russ.)
 14. Valeeva A.F., Totskov I.E. Solving the problem of three-dimensional packaging. *Kompleksnyj analiz, differencial'nye uravneniya, chislennye metody i prilozheniya: materialy mezhdunarodnoj konferencii: materialy vsrossijskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii*. Ufa: IMVC UNC RAN, 1996, pp. 30–36. (In Russ.)
 15. Verkhoturov M.A., Verkhoturova G.N. On the problem of three-dimensional packaging of objects of complex geometric shapes. *Rol' geometrii v iskusstvennom intellekte i sistemah avtomatizirovannogo proektirovaniya: materialy vsrossijskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii*. Ulan-Ude, 1996, pp. 43–45. (In Russ.)
 16. Gil N.I. Mathematical modeling of irregular placement of planar geometric objects in design automation systems (theoretical foundations, methods, applications): avtoref. diss. ... cand. tech. sciences. Minsk, 1990, 32 p. (In Russ.)
 17. Stoyan Yu.G., Yakovlev S.V. *Mathematical models and optimization methods of geometric design*. Kiev: Sciences Dumka, 1986. 286 p. (In Russ.)
 18. Dyckhoff H. A typology of cutting and packing problems. *European Journal of Operational Research*, 1991, no. 44, pp. 145–159.
 19. Gilmore P.C., Gomory R.E. A linear programming approach to the cutting stock problem. *Operation Research*, 1961, vol. 9, no. 6, pp. 849–859.
 20. Khasanov R.I., Dyaminova E.I. Mathematical and software support for the placement of orthogonal objects in a polygonal area based on matrix technology. *Molodezhnyj vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviacionnogo tehničeskogo universiteta*, 2019, no. 1 (20), pp. 183–186. (In Russ.)
 21. Yahui S., Saman H. Minimum-Cost Heterogeneous Node Placement in Wireless Sensor Networks. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 14847–14858.
 22. Sklyar B. Digital Communication. *Theoretical foundations and practical application*. 2th Ed., revised. Moscow: Izd-vo Williams, 2007, 1104 p. (In Russ.)

Received 11.07.2023

ТЕХНОЛОГИИ КОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМ И СЕТЕЙ

УДК 004.896

МОДЕЛИ РАСПРЕДЕЛЕННОГО ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ПЕРСПЕКТИВНЫХ СЕТЯХ СВЯЗИ

Обухов С.А., Елагин В.С.

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций

им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, РФ

E-mail: stasstas1155@yandex.ru

Технология 6G создаст интеллектуальную, высокомасштабируемую, динамичную и программируемую сеть беспроводной связи, способную обслуживать множество разнородных беспроводных устройств. Различные

узлы и устройства 6G будут генерировать колоссальные объемы распределенных данных, поэтому в сети пост-NGN (New Generation Networks) потребуется внедрить различные методы машинного обучения, которые позволят решать очень сложные сетевые задачи. Из-за нехватки ресурсов, ограничений по задержке и проблем с конфиденциальностью, пограничные устройства не могут выгрузить весь собранный ими набор данных на облачный сервер для централизованного обучения моделей. Для преодоления этих проблем можно использовать методы распределенного обучения, позволяющие устройствам совместно обучать модели без обмена необработанными данными, что снижает расходы на связь, задержки, а также повышает конфиденциальность данных. Модели распределенного машинного обучения будут играть важную роль в сетях 6G, они имеют ряд преимуществ перед централизованными методами, однако, реализация распределенных алгоритмов в беспроводных средах с ограниченными ресурсами может оказаться сложной задачей. Важно учитывать неопределенность беспроводной среды, связанную с большим количеством возмущающих факторов, ограниченные беспроводные (мощность передачи, радиочастотный спектр) и аппаратные (вычислительная мощность) ресурсы. Следовательно, важно выбрать правильный алгоритм машинного обучения, основанный на характеристиках беспроводной среды и требованиях к ресурсам процесса обучения. В статье рассматривается применение моделей распределенного искусственного интеллекта в коммуникационных сетях нового поколения, с целью управления ресурсами и обработки данных. Описываются основные алгоритмы и подходы распределенного машинного обучения, области применения, методы и модели. В статье анализируются способы, которыми распределенные модели искусственного интеллекта могут решать различные задачи в сетях связи, включая оптимизацию использования ресурсов и обеспечение высокой производительности и доступности сетевых сервисов.

Ключевые слова: машинное обучение, распределенное обучение, федеративное обучение, мультиагентное обучение, 5G, 6G, пост-NGN

Введение

Распределенный искусственный интеллект (Distributed artificial intelligence, DAI), децентрализованный искусственный интеллект (ИИ), представляет собой область исследований ИИ, посвященную разработке распределенных решений проблем. DAI тесно связан с многоагентными системами и является их предшественником.

Системы DAI состоят из автономных узлов обработки обучения, которые могут действовать независимо. Распределенный искусственный интеллект способен решить проблемы рассуждения, планирования, обучения и восприятия искусственного интеллекта, особенно если они требуют больших объемов данных, распределяя проблему на автономные узлы обработки. Это ИИ, разнесенный на несколько компьютеров, не объединенных в общий вычислительный кластер.

DAI это тот же самый ИИ, только разнесенный на несколько компьютеров, не объединенных в единый вычислительный кластер (ни по данным, ни по приложениям, ни по доступу к отдельным компьютерам в принципе). То есть в абсолют, DAI должен быть распределен так, чтобы ни с одного из участвующих в этом «распределении» компьютеров не было возможности получить прямой доступ ни к данным, ни к приложениям других компьютеров: единственной альтернативой становится передача фрагментов данных или скриптов приложений через «явные» сообщения. Любые отступления от этого абсолюта, по идее, приводят к возникновению «частично распределенного искусственного интеллекта» – например, данные распределены, а сервер приложений об-

щий. Или наоборот. Так или иначе, мы получаем на выходе набор «федерированных» моделей (т. е. либо обученных каждая на своем источнике данных, либо обученных каждая своим алгоритмом, либо «и то и другое вместе»).

Обзор предметной области

Быстрый рост объема данных и доступности информации в последние годы привел к изменению парадигмы (набора концепций и шаблонов) в беспроводных сетях: большими данными (big data) больше нельзя управлять как единым целым. Следует предусмотреть новые распределенные малые данные (small data), когда большие объемы данных распределяются между несколькими узлами для их обработки [1].

Стандарт 6G обеспечит подключение по всему миру, уменьшит задержку и позволит расширять приложения, основанные на чрезвычайно плотных и разнообразных беспроводных сетях, таких как системы Интернета вещей (Internet of Things, IoT) [2].

Интеллектуальное взаимодействие между устройствами по всей сети является целью разработки методов распределенного машинного обучения (Distributed Machine Learning, DML). DML будет иметь важное значение для управления и эксплуатации постоянно увеличивающегося объема данных и коммуникаций в межмашинном взаимодействии (machine to machine) в сетях, которые находятся не в оптимальных условиях. В таких приложениях нет необходимости отправлять большие объемы данных в центральную систему, которая создает обучающую модель. Вместо этого, обработкой данных и локальными наблюдени-

ями занимаются сами устройства на границе сети. Такие решения имеют различные преимущества: значительное снижение нагрузки на передачу данных, возможность оптимизации использования ресурсов, а также экономия средств [3].

В отличие от предыдущих поколений, беспроводные сети 5G, добиваются существенных улучшений в задержке, скорости передачи данных, мобильности и количестве подключенных устройств. Сеть 5G с интегрированными технологиями, такими как IoT, mobile edge computing (MEC), fog computing и machine learning (ML), охватывает различные сферы жизни общества, включая робототехнику, автомобильные сети, здравоохранение. По прогнозам, сети 5G достигнут своего предела через десятилетие, поэтому, ученые и органы по стандартизации уже работают над созданием нового поколения беспроводной связи, получившего название 6G [4; 5].

Ключевые технические задачи для сетей 6G [6]:

- сверхвысокая скорость передачи данных (до 1 Тбит/с);
- сверхнизкая задержка;
- высокая энергоэффективность для устройств с ограниченными ресурсами;
- покрытие сети по всему миру;
- надежное и интеллектуальное подключение по всей сети.

Спектр потребностей приложений 6G будет охватывать широкий диапазон пропускной способности, задержек, надежности, масштабируемости, доступности услуг, непрерывности обслуживания и аспектов безопасности. Одновременно достижение значительно более высокой ресурсоэффективности, чем в 5G, является важным шагом не только к расширению пропускной способности спектра, но и к достижению амбициозных целей по снижению энергопотребления для будущих сетей. В результате конструкция радиодоступа 6G должна быть гибкой и ресурсоэффективной, с возможностью корректировки в режиме реального времени [7].

Поддержка требований широкого спектра приложений и вариантов использования 6G является серьезной задачей. Для поддержки таких новых технологических достижений необходимо обеспечить гораздо более высокий уровень интеллекта, и приложить больше усилий по обработке данных. Поэтому искусственный интеллект (Artificial Intelligence, AI) и ML рассматриваются как фундаментальные элементы грядущих сетей 6G, а не просто как инструмент оптимизации для оценки производительности.

Однако, большинство современных решений

AI и ML используют централизованное обучение (centralized learning, CL), при котором данные собираются по всей системе, но обучение выполняется в одном месте. CL не является идеальным, часто бывает слишком дорогостоящим на распределенной платформе, в сетях операторов связи. В централизованном центре обработки данных существуют значительные требования к энергоснабжению, которые должны покрываться ответственным арендатором/владельцем, а также соображения конфиденциальности [7].

В результате, по мере приближения к внедрению сетей 6G, будет крайне важно разработать новые процедуры, которые позволят системе функционировать должным образом, а также координировать обучение и распределение вычислительных, сетевых, накопительных (ресурсы хранилищ) и энергетических ресурсов.

С инженерной точки зрения, способность управлять чрезвычайно разнообразными ресурсами, динамичность системы и эффективное обучение в режиме реального времени являются основными препятствиями для достижения такого рода технологического развития. С другой стороны, в области алгоритмики будущие объективные решения будут включать возможность выполнять обучение с использованием сильно фрагментированных данных, small data, повышать эффективность в динамичных средах и управлять агентами передачи совместного обучения (AI-powered collaborative learning) с целью оптимизации обработки аномалий.

Алгоритмы распределенного машинного обучения

С развитием стандарта беспроводной связи 5G в сетевые инфраструктуры интегрируется большой набор разнородных устройств с датчиками, возможностями хранения и обработки данных. Эти устройства могут собирать терабайты данных, которые могут быть использованы для анализа и решения различных сетевых задач. Для этих операций могут быть полезны различные алгоритмы ML.

При традиционных централизованных подходах к ML, данные, собранные устройствами, должны передаваться на централизованный узел, оснащенный более мощными возможностями обработки. Однако, ресурсы беспроводных устройств могут быть ограничены, и такой подход может оказаться сложным, особенно в случае приложений и служб, требовательных к низким задержкам. Кроме того, пользователи сети становятся все более осведомленными о конфиденци-

альности и неохотно делятся своими конфиденциальными данными с внешним миром, чтобы избежать потенциальной кражи данных.

Благодаря недавнему прогрессу в аппаратных и программных технологиях, устройства могут обрабатывать ограниченный набор данных на борту (onboard), что позволяет им создавать локальные модели ML на основе своих данных, однако, точность таких моделей ограничена.

Интегрируя локальные вычислительные устройства и возможности централизованной обработки данных, можно реализовать различные методы deep learning (DL) и федеративного обучения (federated learning, FL) [8].

Кроме того, сетевые настройки, основанные на облачных вычислениях, все чаще заменяются обработкой на границе сети, то есть пограничными вычислениями (edge computing AI), что позволяет реализовать алгоритмы ML для наилучшего использования данных, генерируемых этими устройствами [8; 9].

Таким образом, в перспективных сетях связи, концепция централизованного ML больше не является доминирующей.

В основе новой тенденции лежит внедрение алгоритмов DL, таких как FL и мультиагентное обучение с подкреплением (multi-agent reinforcement learning, MARL).

Федеративное, объединенное обучение

Федеративное, объединенное обучение (FL, также известное как совместное обучение) – это метод ML, который обучает алгоритм с помощью нескольких независимых сеансов, каждый из которых использует свой собственный набор данных. Этот подход отличается от традиционных централизованных методов машинного обучения, при которых локальные наборы данных объединяются в один учебный сеанс, а также от подходов, предполагающих, что локальные выборки данных распределены идентично.

FL позволяет нескольким участникам создавать общую, надежную модель ML без совместного использования данных, решая таким образом такие важнейшие проблемы, как обеспечение конфиденциальности данных, безопасности данных, права доступа к данным, порядок доступа к разнородным данным. Приложения FL применяются в отраслях телекоммуникации и IoT.

FL направлено на обучение алгоритма ML, например, глубоких нейронных сетей (deep neural networks), на нескольких локальных наборах данных, содержащихся в локальных узлах, без явного обмена выборками данных. Общий принцип

заключается в обучении локальных моделей на локальных выборках данных и обмене параметрами (например, весами и смещениями глубокой нейронной сети) между этими локальными узлами с некоторой частотой для генерации глобальной модели, общей для всех узлов [10].

Основное различие между FL и DL заключается в предположениях, сделанных относительно свойств локальных наборов данных, поскольку DL изначально направлено на распараллеливание вычислительной мощности, в то время как FL изначально направлено на обучение на разнородных наборах данных. Хотя DL также направлено на обучение одной модели на нескольких серверах, общим базовым предположением является то, что локальные наборы данных независимы, распределены одинаково и имеют примерно одинаковый размер. Ни одна из этих гипотез не выдвигается для FL, вместо этого наборы данных, как правило, неоднородны, и их размеры могут варьироваться на несколько порядков. Более того, клиенты, участвующие в FL, могут быть ненадежными, поскольку они подвержены большему количеству сбоев или выбывают из системы, поскольку они обычно полагаются на менее мощные средства связи (например, Wi-Fi) и системы с батарейным питанием (например, смартфоны и устройства IoT) по сравнению с DL, где узлами обычно являются центры обработки данных с мощными вычислительными возможностями и соединены друг с другом быстрыми сетями [11].

Компания Google предложила концепцию FL в 2016 году. Учитывая огромный объем данных, доступных в настоящее время в сети, концепция состоит в том, чтобы построить модели ML на основе наборов данных, распределенных по большому количеству устройств, избегая при этом разброса данных.

Цель этой стратегии – предоставить пользователям преимущества наличия огромного объема доступных данных без необходимости их централизованного хранения.

Обычно все данные от N владельцев группируются вместе и используются для обучения модели. В системах FL каждому владельцу данных не нужно предоставлять свои данные другим пользователям.

Мультиагентное обучение с подкреплением

Мультиагентное обучение с подкреплением (MARL) – это подотрасль обучения с подкреплением. Она фокусируется на изучении поведения множества обучающихся агентов, которые сосу-

ществуют в общей среде. Каждый агент мотивирован своими собственными вознаграждениями и совершает действия для продвижения своих собственных интересов. В некоторых средах эти интересы противоположны интересам других агентов, что приводит к сложной групповой динамике.

Различные проблемы беспроводной связи могут быть смоделированы как проблемы последовательного принятия решений и могут быть эффективно решены с помощью подходов, основанных на RL.

В большинстве беспроводных сред требуется настройка нескольких агентов, чтобы они могли взаимодействовать друг с другом и влиять на процессы принятия решений друг другом.

Поэтому MARL является потенциальным кандидатом для решения различных задач последовательного принятия решений в различных беспроводных средах, благодаря разработкам методов функциональных приближений, исследованиям операций в многоагентных системах [12].

Настройки MARL можно разделить на три основные группы, основанные на взаимодействии агентов друг с другом.

В первом случае, полностью кооперативных настроек MARL, все агенты могут работать сообща над оптимизацией общей цели или сигналов вознаграждения. В этой ситуации агенты обычно получают аналогичные вознаграждения [13].

Во втором случае, полностью конкурентных настроек MARL, все агенты могут конкурировать друг с другом, каждый агент эгоистично пытается максимизировать свое вознаграждение. Следовательно, общая сумма значений вознаграждения для всех агентов, участвующих в процессе обучения, может быть равна нулю [13].

Существуют также гибридные системы MARL, в которых могут присутствовать как кооперативные, так и конкурирующие агенты.

Основные области применения DL

Основные области применения методов DL:

1. Наземные сети (Non-terrestrial networks, NTN).

Недавно в наземные сетевые системы были интегрированы различные новые наземные сетевые платформы, чтобы увеличить доступное количество ресурсов, решить проблемы, связанные с безопасностью, и придать гибкость и большую устойчивость каналам связи.

Различные методы DL нашли свое применение в NTN, такие как приложения, включающие совместное использование спектра, проектирование траекторий, оптимизацию трафика, безопасность, а также распределение задач и ресурсов [4].

23 февраля 2023 года компания *Samsung Electronics* объявила о создании системы «5G NTN», которая обеспечит возможность непосредственного обмена информацией между смартфонами и спутниками.

Для поддержания высоконадежной связи со спутниками на низкой околоземной орбите будет использоваться аппаратная платформа *Eunos Modem 5300*, соответствующая стандарту «3GPP Release 17». Платформа функционально совместима с решениями, предлагаемыми глобальными операторами связи, производителями мобильных устройств, поставщиками чипов. Предполагается поддержка технологий DAI и DL, чтобы ускорить спутниковую связь 5G и продолжить путь к эре 6G.

2. Автомобильные самоорганизующиеся сети (Vehicular ad-hoc network, VANET).

Методы DL широко используются для решения сложных задач в VANET. Основные области применения включают интеллектуальное обнаружение объектов, распределение сетевых ресурсов, обмен данными с транспортными средствами, разгрузку вычислений в системах с поддержкой периферийных вычислений, управление светофорами [14].

3. Энергетические системы (Power systems).

В последнее время для решения проблем, связанных с энергосистемой, используются различные методы DL. Основные области энергосистем, где используются методы DL: регулирование напряжения, управление энергопотреблением, прогнозирование спроса, повышение стабильности в переходных процессах и отказоустойчивости [15].

4. Сети электронного здравоохранения (E-health).

Системы E-health наполняются различными новыми приложениями с высокой вычислительной сложностью и требованиями к ресурсам. Различные методы DL нашли применение в системах E-health [16].

Учитывая конфиденциальный характер медицинских данных, подходы FL, обеспечивающие сохранение конфиденциальности, вызвали большой интерес. Последние достижения в области технологии FL применимы к E-health, особенно для Интернета медицинских вещей (Internet of Medical Things, IoMF). Предполагается создание многослойной платформы FL, защищающей конфиденциальность IoMF.

DML в сетях 6G

AI играет ключевую роль в определении видения будущих технологий 6G. Методы ML, в частности DML, могут сыграть важную роль в технологии 6G в 2030-х годах.

В этом разделе будут рассмотрены и проанализированы некоторые методы DML, применяемые в области телекоммуникаций.

Существует глобальная модель ML, основанная на традиционной методике (Federated Averaging Algorithm, FedAvg), которая была описана ранее. Она используется в случае, если все устройства имеют независимые и идентично распределенные наборы данных (Independent and Identically Distributed Data, IID).

Однако на практике, в системах с беспроводной связью и разнородными узлами, традиционные FL системы на базе IID имеют ограниченную производительность, они не подходят для применения в области беспроводных сетей.

Учитывая это, группы ученых (*Chen M., Gündüz D., Huang K., Saad W., Bennis M., Feljan A.V., Poor H.V.*) в научной статье «*Distributed Learning in Wireless Networks: Recent Progress and Future Challenges*» предложили два усовершенствованных алгоритма FL: объединенное многозадачное обучение (federated multi-task learning, FMTL) и FL на основе метаобучения, не зависящего от модели (model agnostic meta-learning, MAML) [3].

В случае FMTL, задача минимизации определяется как:

$$\min_{M, \Omega} \sum_{i=1}^U \sum_{k \in K_i} f(m_i, x_{i,k}, y_{i,k}) + R(M, \Omega), \quad (1)$$

где $M = [m_1, m_2, \dots, m_U]$; Ω – моделирует взаимосвязь между различными операциями обучения устройства; R – функция регулирования.

Задачу можно разделить на подзадачи, чтобы предоставить устройствам возможность работать распределенным образом для достижения поставленной цели. Все устройства в FedAvg используют одну и ту же модель конвергенции (convergence), однако, в случае FMTL, устройства могут иметь разную сходимость (convergences), поскольку одна модель может иметь меньшие потери при обучении, чем другая, из-за распределения, отличного от IID [3].

Методика FL, основанная на MAML, пытается разработать модель ML, которая позволяет каждому устройству создать свою собственную модель после нескольких «итераций градиентного спуска» (используется метод Stochastic Gradient Descent, SGD).

Градиентный спуск (GD) – это итеративный алгоритм оптимизации первого порядка, используемый для нахождения локального минимума / максимума заданной функции. GD используется в ML и DL для минимизации функции затрат/потерь, например, в линейной регрессии.

В этой ситуации задача формулируется следующим образом:

$$\min_m \sum_{i=1}^U \frac{P_i}{k_i} \sum_{k \in K_i} f(m - \lambda \nabla f_i, x_{i,k}, y_{i,k}), \quad (2)$$

где ∇f_i – градиент снижения локальной ML модели i -го устройства; λ – скорость обучения.

Основные характеристики подходов FMTL и MAML:

1. Алгоритм FMTL напрямую оптимизирует локальную модель каждого устройства, в то время как MAML оптимизирует исходную модель всех устройств.

2. При работе с данными IID необходим алгоритм FedAvg. FMTL и MAML более практичны для данных, не относящихся к IID.

3. Сервер параметров (parameter server, PS) должен знать о распределении данных в устройствах, чтобы выбирать между FMTL и MAML.

4. Все алгоритмы FL должны обучаться с помощью распределенного итеративного процесса (distributed iterative algorithms).

Показатели производительности FL в беспроводных сетях

Для оценки эффективности реализации FL в беспроводных сетях используются четыре ключевых показателя: 1) потери при обучении (training loss); 2) время конвергенции, сходимости (convergence time, T); 3) потребление энергии; 4) надежность [17].

1) Потери при обучении – это значение функции потерь (f), которая используется в формулах (1) и (2). Модели устройств ML передаются по несовершенным соединениям в беспроводных сетях, следовательно, возможны проблемы с передачей, которые могут серьезно влиять на потери при обучении. Кроме того, из-за ограниченной энергии и вычислительной мощности, только небольшое подмножество устройств может активно участвовать в процессе обучения, в результате чего только часть моделей ML используется для построения глобальной модели, и это также приводит к негативным последствиям [4].

2) Время сходимости для реализаций FL в беспроводных сетях выражается как [4]:

$$T = (T_c + T_T) \times N_T, \quad (3)$$

где T_c – время, необходимое каждому устройству для обновления своей локальной модели на каждом шаге обучения;

T_T – максимальное время передачи данных на каждом шаге обучения;

N_T – количество шагов обучения, необходимое для конвергенции, сходимости FL.

Из (3) видно, что T FL зависит от трех компонентов: 1) задержки передачи параметров ML T_T ; 2) времени T_c , необходимого каждому устройству для обучения своей локальной модели ML; 3) количества шагов обучения N_T .

Оба фактора N_T и T_c являются зависимыми. Увеличение количества шагов SGD для обновления локальной модели на каждом этапе обучения (например, за счет увеличения T_c) может уменьшить количество шагов, необходимых FL для сходимости.

3) Энергопотребление (E) каждого устройства, участвующего в обучении FL, выражается как [4]:

$$E = (E_c + E_T) \times N_T, \quad (4)$$

где E_c – энергия, потребляемая каждым устройством во время обучения его модели на каждом шаге обучения;

E_T – энергия, необходимая для передачи параметров ML на PS на каждом этапе;

N_T – количество шагов обучения, необходимое для конвергенции, сходимости FL.

Из (4) видно, что энергопотребление каждого устройства зависит от трех компонентов: 1) энергопотребления для передачи параметров ML; 2) энергопотребления для обучения локальной модели ML; 3) количества шагов обучения, которое необходимо FL для сходимости.

4) Надежность FL определяется как вероятность того, что FL достигнет определенного (целевого) значения потерь при обучении. Устройства, которые фактически участвуют в каждой фазе обучения, являются подмножеством общего числа устройств, поэтому устройства и передающиеся параметры могут меняться на каждом этапе. Это может повлиять на T и потери [4].

Влияние характеристик беспроводной связи на показатели FL

Характеристики беспроводной сети, такие как спектр, мощность передачи и вычислительная мощность, влияют на показатели FL, обозначенные в предыдущем разделе [4].

В таблице 1 обобщена взаимосвязь между различными характеристиками беспроводной связи

и показателями производительности FL. Символ «+» означает, что изменение параметра связи повлияет на показатели производительности FL.

Например, ресурс спектра, выделенный каждому устройству для передачи параметров FL, будет влиять на потери при обучении. Время передачи параметров FL на шаг обучения T_c , потребление энергии при передаче параметров FL E_c и надежность FL.

Таким образом, на основе данных из таблицы 1, чтобы дать оценку эффективности реализации FL, можно описать взаимосвязь характеристик беспроводных сетей и показателей FL.

На производительность FL влияют факторы беспроводной связи, в частности, спектральные ресурсы, выделенные на каждом устройстве, определяют отношение сигнала к помехам и шуму (signal to interference-plus-noise ratio, SINR), скорость передачи данных и вероятность того, что параметр содержит ошибки. В результате они оказывают влияние на потери при обучении, TT, ET и надежность обучения [18].

Количество обновлений метода SGD, которые могут быть сделаны для каждого этапа обучения, определяется вычислительной мощностью. В результате это влияет на количество времени и энергии, затрачиваемых на локальное обучение. В то же время, уменьшение количества обновлений SGD увеличит потери при обучении и количество шагов, необходимых для сходимости FL.

Таким образом, SINR, скорость передачи данных и вероятность включения ошибок при передаче параметров – все это определяется мощностью передачи и беспроводным каналом. В результате увеличение мощности передачи каждого устройства снижает потери, TT, NT и надежность при одновременном увеличении ET.

В FL потери при обучении и NT уменьшаются по мере увеличения числа участников, в то время как TT и надежность повышаются.

Потери при обучении, надежность и общее количество этапов обучения могут уменьшаться по мере увеличения количества параметров FL, обучаемых каждым устройством. Однако количество

Таблица 1. Влияние характеристик беспроводной связи на показатели FL

Характеристика	Потеря передачи	T_c	T_T	N_T	E_c	E_T	Надежность
Спектральный ресурс	+		+	+		+	+
Вычислительная мощность	+	+		+	+		
Мощность передачи	+		+	+		+	+
Беспроводной канал	+		+	+		+	+
Набор устройств, участвующий в FL	+		+	+			+
Размер параметров FL обученных каждым устройством	+	+		+	+		+
Размер параметров FL передаваемых каждым устройством			+			+	

энергии и времени, затрачиваемых на обучение модели, возрастет.

Заключение

Несмотря на то, что в сетях 6G могут быть реализованы значительные вычислительные мощности и широкополосная передача данных, задержки и проблемы с пропускной способностью могут по-прежнему мешать обучению моделей на больших объемах данных. В этом контексте распределенные подходы машинного обучения становятся крайне важным инструментом для обработки больших объемов данных.

Одним из преимуществ DML является возможность обработки больших объемов данных, которые будут генерироваться в сетях 6G, без необходимости передачи их на центральный сервер. Это позволяет сохранять конфиденциальность данных и уменьшать нагрузку на сеть.

В сетях 6G могут использоваться различные подходы к ML, FL, MARL, а также различные методы, включая метод средних скользящих, метод минимального фрагмента, метод линейной регрессии. Каждый из этих методов имеет собственные преимущества и ограничения, которые должны быть учтены при выборе метода для конкретной задачи. Распределенные методы могут помочь ускорить обучение, снизить задержки, улучшить производительность. DML способно обеспечить более быстрый доступ к данным и лучшие показатели энергопотребления в сетях 6G.

FL позволит обучать модели на данных, которые хранятся на разных устройствах, без необходимости передачи этих данных на центральный сервер. То есть, несколько устройств смогут «сотрудничать» в задаче ML, не раскрывая свои данные, обеспечивая конфиденциальность и безопасность.

MEC позволят выполнять обработку данных ближе к источнику, снижая задержку и уменьшая нагрузку на центральный сервер, что улучшит эффективность сети.

Подходы на основе блокчейна могут улучшить безопасность и прозрачность DML, предоставляя децентрализованную и невозможную для подделки среду для обмена и обработки данных.

MARL может быть использовано для создания автономных систем, которые могут принимать решения на основе полученных данных.

Комбинация этих методов может позволить сетям 6G обрабатывать огромные объемы данных в режиме реального времени и поддерживать различные приложения, такие как NTN, VANET умные города и E-health. Это может привести к

более эффективному использованию ресурсов сети и улучшению качества жизни людей.

Таким образом, разработка распределенных алгоритмов ML является важным направлением исследований для создания эффективных и масштабируемых 6G сетей.

Литература

1. Saad W., Bennis M., Chen M. A vision of 6G wireless systems: Applications, trends, technologies, and open research problems // *IEEE Network*. 2020. Vol. 34, no. 3. P. 134–142.
2. 6G Wireless Communications: Vision and Potential Techniques / P. Yang [et al.] // *IEEE Network*. 2019. Vol. 33, no. 4. P. 70–75.
3. Distributed Learning in Wireless Networks: Recent Progress and Future Challenges / M. Chen [et al.] // *IEEE Journal on Selected Areas Communications*. 2021. Vol. 39. P. 3579–3605.
4. Muscinelli E., Shinde S. S., Tarch D. Overview of Distributed Machine Learning Techniques for 6G Networks // *Algorithms*. 2022. Vol.15. P. 210:1–210:28.
5. Елагин В.С., Богачев А.В., Белозерцев И.А. Модель оценки сквозной задержки пакетов для цепочки NFV узлов в сетях пятого поколения // *T-Comm: Телекоммуникации и транспорт*. 2022. Т. 16, № 3. С. 23–30.
6. A Survey on Green 6G Network: Architecture and Technologies / T. Huang [et al.] // *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. P.175758–175768.
7. Bishoyi P.K., Misra S. Enabling Green Mobile-Edge Computing for 5G-Based Healthcare Applications // *IEEE Transactions Green Communications Networking*. 2021. Vol. 5, no. 3. P. 1623–1631.
8. Distributed machine learning for multiuser mobile edge computing systems / Y. Guo [et al.] // *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*. 2022. Vol. 16, no. 3. P. 460–473.
9. Distributed Edge Computing with Blockchain Technology to Enable Ultra-Reliable Low-Latency V2X Communications / A. Vladyko [et al.] // *Electronics*. 2022. Vol. 11. P. 3–4. DOI 10.3390/electronics11020173.
10. Communication-Efficient Learning of Deep Networks from Decentralized Data / H.B. McMahan [et al.] // *Proceedings of the 20th International Conference on Artificial Intelligence and Statistics (AISTATS)*. Ft. Lauderdale, USA, 2017. Vol. 54. P. 1273–1282.
11. Federated Machine Learning: Concept and Applications / Q. Yang [et al.] // *ACM Transactions*

- on Intelligent Systems Technologies. 2019. Vol. 10, no. 2. P. 12:1–12:19.
12. Feriani A., Hossain E. Single and multi-agent deep reinforcement learning for AI-enabled wireless networks: A tutorial // *IEEE Communications Surveys and Tutorials*. 2021. Vol. 23, no. 2. P. 1226–1252.
 13. Zhang K., Yang Z., Basar T. Multi-Agent Reinforcement Learning: A Selective Overview of Theories and Algorithms: *Handbook of Reinforcement Learning and Control*. Switzerland, Cham: Springer, 2021. P. 321–384.
 14. Two-layer federated learning with heterogeneous model aggregation for 6g supported internet of vehicles / X. Zhou [et al.] // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2021. Vol. 70. P. 5308–5317.
 15. Gholizadeh N., Musilek P. Distributed learning applications in power systems: A Review of Methods, Gaps, and Challenges // *Energies*. 2021. Vol. 14. P. 3654.
 16. Bishoyi P.K., Misra S. Towards Energy-and Cost-Efficient Sustainable MEC-Assisted Healthcare Systems // *IEEE Transactions on Sustainable Computing*. 2022. Vol. 7, no. 2. P. 550–556.
 17. Providing QOS for OTT Services in Communication Networks / A.B. Goldstein [et al.] // *2020 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*. Moscow: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2020. P. 9078633. DOI: 10.1109/IEEECONF48371.2020.9078633

Получено 30.08.2023

Обухов Станислав Андреевич, аспирант кафедры инфокоммуникационных систем (ИКС) Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича (СПбГУТ). 193232, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, пр. Большевиков, 22, к. 1. Тел. +7 996 798-46-08. E-mail: stasstas1155@yandex.ru

Елагин Василий Сергеевич, к.т.н., доцент кафедры ИКС СПбГУТ. 193232, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, пр. Большевиков, 22, к. 1. Тел. +7 812 326-31-63 (2100). E-mail: v.elagin@spbgut.ru

DISTRIBUTED ARTIFICIAL INTELLIGENCE MODELS IN PERSPECTIVE COMMUNICATION NETWORKS

Obukhov S.A., Elagin V.S.

*The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications,
Saint Petersburg, Russian Federation*

E-mail: stasstas1155@yandex.ru

6G technology will create an intelligent, highly scalable, dynamic and programmable wireless network capable of serving a variety of heterogeneous wireless devices. Various 6G modules and devices will generate colossal amounts of distributed data, so post-NGN (New Generation Networks) will need to implement a number of machine learning methods that will solve significantly complicated network problems. To overcome these problems, distributed learning methods can be used, allowing devices to train models jointly, without exchanging raw data, which reduces communication costs, delays, and increases data privacy level as well. Distributed machine learning models will play an important role in 6G networks, since they have a number of advantages over centralized methods, however, the implementation of distributed algorithms in resource-constrained wireless environments can be challenging. It is important to take into account the wireless environment uncertainty associated with various disturbing factors and limited wireless (transmission power, radio frequency spectrum) and hardware resources (computing power). Consequently, it is important to choose the suitable machine learning algorithm based on the wireless environment characteristics and the resource requirements of the learning process. The article reviews the application of distributed artificial intelligence models in new generation communication networks for resource management and data processing purposes. The general algorithms and approaches of distributed machine learning, applications, methods and models are described. The article analyzes the ways in which distributed artificial intelligence models can solve various problems in communication networks, including optimizing resource use and ensuring high performance and availability of network services.

Keywords: machine learning, distributed learning, federated learning, multi-agent learning, 5G, 6G, post-NGN

DOI: 10.18469/ikt.2023.21.1.08

Obukhov Stanislav Andreevich, Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications, 22, building 1, Bolshevikov Avenue, Saint Petersburg, 193232, Russian Federation; PhD Student of the Department of Infocommunication Systems. Tel. +7 996 798-46-08. E-mail: stasstas1155@yandex.ru

Elagin Vasily Sergeevich, Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications, 22, building 1, Bolshevikov Avenue, Saint Petersburg, 193232, Russian Federation; Associate Professor of Infocommunication Systems Department, PhD in Technical Science. Tel. +7 812 326-31-63 (2100). E-mail: v.elagin@spbgut.ru

References

1. Saad W., Bennis M., Chen M. A vision of 6G wireless systems: Applications, trends, technologies, and open research problems. *IEEE Network*, 2020, vol. 34, no. 3. pp. 134–142.
2. Yang P. et al. 6G Wireless Communications: Vision and Potential Techniques. *IEEE Network*, 2019, vol. 33, no. 4, pp. 70–75.
3. Chen M. et al. Distributed Learning in Wireless Networks: Recent Progress and Future Challenges. *IEEE Journal on Selected Areas Communications*, 2021, vol. 39, pp. 3579–3605.
4. Muscinelli E., Shinde S.S., Tarch D. Overview of Distributed Machine Learning Techniques for 6G Networks. *Algorithms*, 2022, vol. 15, pp. 210:1–210:28.
5. Elagin V.C., Bogachov A.V., Belozertsev I.A. Modeling the estimation of end-to-end packet latency for a chain of NFV nodes in 5G networks. *T-Comm: Telecommunication and Transport*, 2022, vol.16, no. 3, pp. 23–30. (In Russ.)
6. Huang T. et al. A Survey on Green 6G Network: Architecture and Technologies. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 175758–175768.
7. Bishoyi P.K., Misra S. Enabling Green Mobile-Edge Computing for 5G-Based Healthcare Applications. *IEEE Transactions Green Communications Networking*, 2021, vol. 5, no. 3, pp. 1623–1631.
8. Guo Y. et al. Distributed machine learning for multiuser mobile edge computing systems. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2022, vol. 16, no. 3, pp. 460–473.
9. Vladyko A. et al. Distributed Edge Computing with Blockchain Technology to Enable Ultra-Reliable Low-Latency V2X Communications. *Electronics*, 2022, vol. 11, pp. 3–4. DOI 10.3390/electronics11020173.
10. McMahan H.B. et al. Communication-Efficient Learning of Deep Networks from Decentralized Data. *Proceedings of the 20th International Conference on Artificial Intelligence and Statistics (AISTATS)*. Ft. Lauderdale, USA, 2017, vol. 54, pp. 1273–1282.
11. Yang Q. et al. Federated Machine Learning: Concept and Applications. *ACM Transactions on Intelligent Systems Technologies*, 2019, vol. 10, no. 2, pp. 12:1–12:19.
12. Feriani A., Hossain E. Single and multi-agent deep reinforcement learning for AI-enabled wireless networks: A tutorial. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2021, vol. 23, no. 2, pp.1226–1252.
13. Zhang K., Yang Z., Basar T. *Multi-Agent Reinforcement Learning: A Selective Overview of Theories and Algorithms: Handbook of Reinforcement Learning and Control*. Switzerland, Cham: Springer, 2021, pp. 321–384.
14. Zhou X. et al. Two-layer federated learning with heterogeneous model aggregation for 6g supported internet of vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, vol. 70, pp. 5308–5317.

15. Gholizadeh N., Musilek P. *Distributed learning applications in power systems: A Review of Methods, Gaps, and Challenges*. *Energies*, 2022, vol. 14, pp. 3654.
16. Bishoyi P.K., Misra S. Towards Energy-and Cost-Efficient Sustainable MEC-Assisted Healthcare Systems. *IEEE Transactions on Sustainable Computing*, 2022, vol. 7, no. 2, pp. 550–556.
17. Goldstein A.B. et al. Providing QOS for OTT Services in Communication Networks. *2020 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*. Moscow: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2020, pp. 9078633. DOI: 10.1109/IEECONF48371.2020.9078633.

Received 30.08.2023

НОВЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 681.3.07

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА КВАНТОВОЙ КРИПТОГРАФИИ

Васин Н.Н.

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ

E-mail: vasin-nn@psuti.ru

Для обеспечения безопасного обмена данными по сети необходимо соблюдать требования к конфиденциальности, целостности и доступности передаваемой информации. Для соблюдения указанных требований производится шифрование данных на передающей стороне и дешифрование полученной информации – на принимающей стороне. Шифрование передаваемого сообщения выполняется по правилам, которые определяются алгоритмом и ключом. Криптобезопасность зашифрованной информации зависит от длины ключа. Среди алгоритмов шифрования выделяют алгоритмы с симметричным (закрытым) ключом и с асимметричным (открытым) ключом. При всех достоинствах закрытого ключа для его доставки от одного пользователя другому (распределение ключей) используют асимметричные ключи. Однако высокопроизводительные квантовые компьютеры способны дешифровать перехваченную информацию. Поэтому в современных криптографических системах используют квантовое распределение ключей. Идея использования квантовых битов была предложена в 1970 г. С. Визнером. В 1984 г. Ч. Беннет и Ж. Brassar предложили протокол BB84. Использование «запутанных» квантов для систем с квантовым распределением ключей предложил в 1991 г. А. Экерт. На основе указанных протоколов создаются все современные системы квантовой криптографии.

Ключевые слова: передача информации, криптография, квантовое распределение ключей, поляризация, протоколы (алгоритмы) шифрования BB84, B92, E91, BBM92, запутанные кванты

Введение

Безопасный обмен сообщениями по сети обеспечивается с помощью алгоритмов и ключей шифрования. Чем длиннее ключ, тем труднее его взломать, т.к. на это тратится больше вычислительных ресурсов. Для безопасного распределения ключей разработан целый ряд протоколов [1].

Среди множества классических алгоритмов (протоколов) шифрования можно выделить два типа: с симметричным (закрытым, секретным) ключом и с асимметричным (открытым) ключом, что позволяет компьютерам совместно использовать ресурсы сети [1–3].

В первом случае передающая и принимающая сторона имеют одинаковый ключ, который нужно заблаговременно доставить обеим сторонам обмена данными. Недостатком алгоритма является сложность доставки ключей множеству взаимо-

действующих пар абонентов по открытым каналам связи (сложность распределения ключей).

В алгоритмах с асимметричным (открытым) ключом используются два ключа: один ключ – при шифровании сообщения, и другой – при расшифровке. Системы шифрования с асимметричным открытым ключом требуют больших вычислительных ресурсов по сравнению с системами с секретным симметричным ключом. Поэтому обычно шифрование с открытым ключом используют для распределения ключей (для обмена ключами) и аутентификации, т.е. для шифрования сравнительно коротких сообщений. Для шифрования больших объемов передаваемых данных используют симметричный алгоритм с секретным (закрытым) ключом [2].

Развитие вычислительной техники и появление высокоскоростных квантовых компьютеров позволит дешифровать перехваченное сообщение

за несколько минут или даже секунд. Поэтому для безопасного распределения ключей разрабатываются новые системы квантовой криптографии.

Методы квантовой криптографии

Методы квантовой криптографии основаны на передаче состояния кванта по сети. В квантовых сетях и системах информацию переносят квантовые биты (q-биты, кубиты), которые представляют собой поляризованные фотоны, передаваемые по волоконно-оптическим линиям связи или беспроводным радиоканалам [3].

Идея использования квантовых битов была предложена Стивеном Визнером (Stephen Wiesner) в 1970 г., но отклонена редакцией журнала IEEE Information Theory [4]. Позднее (в 1984 г.) Чарльзом Беннетом (Charles Bennett) и Жилем Brassаром (Gilles Brassard) был предложен протокол BB84 [5; 6]. Идеи, заложенные в [5; 6] остаются актуальными до настоящего времени. Некоторые публикации, посвященные BB84, представлены в списке литературы [7–12].

Согласно протоколу BB84, носителями информации являются фотоны, которые могут быть поляризованы под углами 0° , 45° , 90° , 135° (рисунок 1).

Открытый и квантовый каналы

Указанные четыре состояния относятся к двум базисам, например, в первом базисе для передачи

0 используется горизонтальная поляризация фотона (0°), а для передачи 1 – вертикальная (90°). Данный базис обычно обозначается \oplus (рисунок 1). Во втором базисе фотон может быть поляризован под углами 45° или 135° . Базис обозначается \otimes .

Таким образом, квант может находиться в одном из четырех состояний. Два состояния поляризации внутри одного базиса ортогональны, но состояния из разных базисов – попарно неортогональны. При попытке измерения квантового состояния нелегитимным пользователем оно изменяется, квант разрушается, о чем сразу становится известно легитимному пользователю. Это свойство (запрета клонирования) и позволяет создавать безопасные квантовые системы криптографии. При этом легитимные пользователи могут обмениваться результатами кодирования по открытым каналам.

Ниже рассмотрен пример формирования согласованного квантового ключа для обмена информацией между абонентами A1 и B2 (рисунок 2).

В литературе первого абонента (A1) обычно называют Алиса, второго пользователя (B2) – Боб, а нелегитимного злоумышленника (хакера) – Ева, задачей которого является перехват трафика между Алисой и Бобом [3–12].

Для реализации протокола BB84 используются два канала: открытый и канал квантового

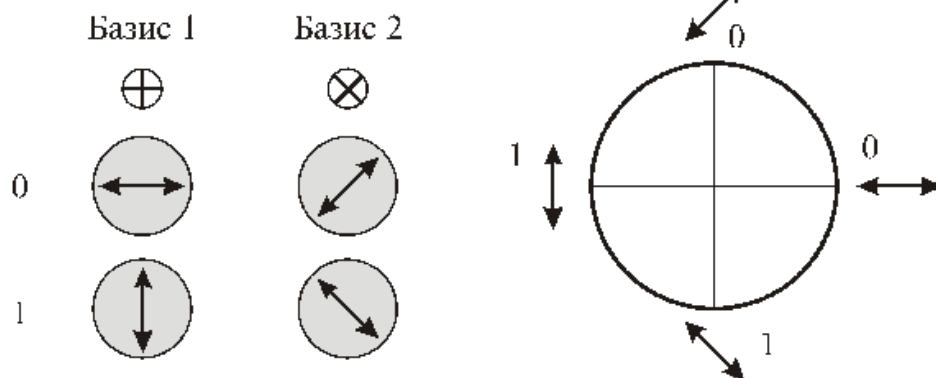


Рисунок 1. Состояния квантовых битов



Рисунок 2. Открытый и квантовый каналы связи

распределения ключей, которые связывают двух пользователей A1 и B2. Пользователь A1 генерирует случайную последовательность битов, из которой затем формируется общий секретный ключ. В литературе [3–12] рассмотрены различные последовательности битов. В приведенном ниже примере генератор случайных чисел узла A1 сформировал последовательность 11001101 (таблица 1), то есть, при формировании первого бита была сгенерирована 1, при этом использовалась диагональная поляризация ↖. Подобное состояние передается пользователю B2 по квантовому каналу (рисунок 2).

На стороне B2 случайным образом выбирается базис поляризации (вертикальный или диагональный) для обработки полученного кубита, например, была выбрана вертикальная поляризация ⊕. Значение базиса поляризации передается пользователю A1 по открытому каналу. В приведенном примере выбранный пользователем B2 базис поляризации ⊕ не совпадает с базисом поляризации ↖ пользователя A1. При отсутствии совпадения базисов A1 и B2 очередной бит кодовой последовательности не формируется. Таким образом, первый бит генерируемой последовательности для создания секретного ключа не был сформирован, на что указывает символ (-) в строке Ключ (таблица 1).

При передаче следующего бита (1) случайным образом выбрана вертикальная поляризация ↑. В рассматриваемом примере выбранный пользователем B2 базис поляризации второго бита ⊕ совпадает с базисом поляризации ↑ пользователя A1. При совпадении базисов A1 и B2 формируется очередной бит кодовой последовательности, т.е. второй бит генерируемой последовательности (равный 1), используется для создания первого бита секретного ключа.

При формировании секретного ключа узел B2 по открытому каналу связи передает узлу A1 значение случайно выбранного базиса поляризации, но значение бита генерируемой последовательности – не передает. Однако A1, получив подтверждение совпадения базисов поляризации, получает сообщение о том, что пользователь B2 сформировал такое же значение кубита, какое передал A1. В рассматриваемом примере на втором такте переда-

ется двоичная единица случайной последовательности. На втором такте произошло совпадение базисов поляризации. Поскольку пользователь A1 передавал значение единицы, то при совпадении базисов узел B2 также сформировал 1.

На третьем такте работы алгоритма базисы поляризации A1 (↔) и B2 (⊗) не совпали, поэтому информационный бит ключа сформирован не был.

На четвертом такте передавался ноль, было совпадение базисов поляризации, поэтому на B2 сформировался 0 (таблица 1), и т.д.

Полученная случайная последовательность битов является общей для A1 и B2, она называется просеянным ключом. Длина просеянного ключа примерно в 2 раза меньше длины исходного (сырого) ключа, в приведенном примере из восьми бит был сформирован четырехразрядный ключ (1011).

На основе протокола BB84 проводится разработка устройств, систем и сетей передачи информации по квантово-оптическим сетям. Схема практической реализации BB84 в квантовом канале сети (рисунок 3) с небольшими изменениями приводится в целом ряде работ, например [3; 7; 10].

На передающей стороне A1 (рисунок 3) формируется одно из 4-х состояний поляризации кванта, переносимого световым импульсом. Изменения поляризации квантов передаваемого потока реализуют поляризатор и ячейки Покеля (Поккельса), которые являются поляризационными модуляторами. Сигналами управления для них служат информационные биты данных.

На принимающей стороне с помощью ячейки Покеля производится анализ импульсов поляризации ⊕ или ⊕. После ячейки Покеля луч попадает на Кальцитную призму (рисунок 3), которая расщепляет луч на два фотодетектора (ФЭУ). Луч с определенной поляризацией дешифруется либо нижним фотоэлектронным умножителем ФЭУ, либо верхним ФЭУ.

Таким образом, схема работает только, если отправитель A1 и получатель B2 знают, какой вид поляризации используется при передаче очередного бита информации. В противном случае получатель не получит ожидаемую информацию, данные будут разрушены. Информацию о выбранном базисе поляризации можно передать по открытому каналу.

Таблица 1. Квантовая криптография. Формирование секретного ключа

Послед. A1	1	1	0	0	1	1	0	1
Поляр. A1	↖	↑	↔	↗	↔	↖	↗	↑
Базис B2	⊕	⊕	⊗	⊗	⊕	⊗	⊕	⊗
Совп.	нет	Совп.	нет	Совп.	Совп.	Совп.	нет	нет
Ключ	-	1	-	0	1	1	-	-

Известен целый ряд модификаций протокола BB84. Например, в работах [3; 9; 13–16] отмечено, что Чарльз Беннет предложил алгоритм B92 для выявления искажений данных, передаваемых по квантовому каналу.

Ниже приведен алгоритм B92 [15]:

1. Отправитель и получатель заранее договариваются о произвольности расположения битов в строках, что определяет произвольный характер положения ошибок.

2. Все строки разбиваются на блоки длиной k , где k выбирается так, чтобы минимизировать вероятность ошибки.

3. Отправитель и получатель определяют четность каждого блока, и сообщают её друг другу по открытому каналу связи. После этого в каждом блоке удаляют последний бит.

4. Если четность двух каких-либо блоков оказалась разной, отправитель и получатель производят итерационный поиск неверных битов и исправляют их.

5. Затем весь алгоритм выполняется заново для другого (большого) значения k . Это делается для того, чтобы исключить ранее незамеченные кратные ошибки.

6. Чтобы определить точность обнаружения всех ошибок, проводится псевдослучайная проверка. Отправитель и получатель открыто сообщают о произвольной перестановке половины битов в строках, а затем вновь открыто сравнивают четности (Если строки различны, четности должны не совпадать с вероятностью 0,5). Если четности отличаются, отправитель и получатель производят двоичный поиск и удаляют неверные биты.

7. Если различий не наблюдается, после n итераций отправитель и получатель получают одинаковые строки с вероятностью ошибки 2^{-n} .

Протокол B92 не стал конкурентом протоколу BB84, поскольку при его использовании сложнее обнаружить вторжение злоумышленника [14]. Отмечена сложность реализации квантового распределения ключей для мобильных устройств телекоммуникаций [16], поскольку необходима установка сложной аппаратуры на обоих концах канала связи, что на данном этапе развития технологий невозможно реализовать в компактном корпусе телефона для мобильной связи. Однако работы по созданию мобильных устройств и систем с квантовым распределением ключей интенсивно ведутся по настоящее время.

Для дальнейшего повышения эффективности функционирования систем квантового распределения ключей используют парадокс EPR (ЭПР – Эйнштейн-Подольский-Розен). Метод квантового распределения ключей (E91) на основе ЭПР был предложен Артуром Экертом (Artur K. Ekert) в 1991 г. [17–20]. Согласно E91 генератор запутанных квантов излучает два фотона в противоположных направлениях, в сторону пользователей A1 и B2 (рисунок 4).

Поляризация каждого кванта передаваемой пары не определена, но их поляризации всегда противоположны. То есть, когда один квант будет в состоянии 0, то второй квант будет находиться в противоположном состоянии 1.

При изменении состояния первого кванта переключение второго происходит мгновенно, независимо от расстояния между «запутанными» частицами. Измерение состояния первого кванта однозначно определяет результат измерения второй «запутанной частицы».

Особенностью метода Экерта является квантовый канал с единственным источником, испускающим пары запутанных квантов (поляризованные фотоны) [17–20]. Частицы разделяются,

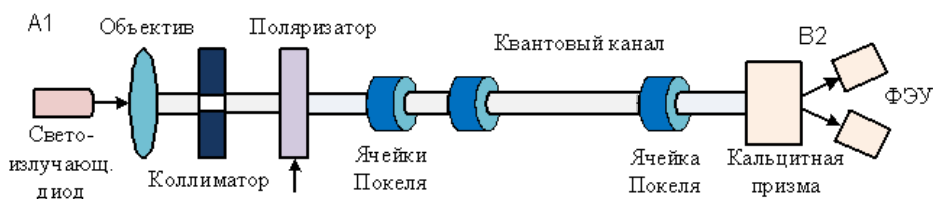


Рисунок 3. Схема практической реализации BB84 в квантовом канале



Рисунок 4. Модель КПК с «запутанными квантами»

при этом A1 и B2 получают по одной частице от каждой пары (рисунок 4). Каждый (A1 и B2) случайным образом выбирает базис поляризации для измерения полученных частиц. Как и в методе BB84, пользователи A1 и B2 открыто обсуждают, какие базисы использованы для измерений. Для каждого измерения, в котором A1 и B2 использовали одинаковые базисы, результаты будут противоположными вследствие реализации принципа квантовой запутанности. То есть, битовая строка, например A1, будет двоичным дополнением B2. Таким образом, A1 и B2 получают общий секретный ключ [17–19].

Разработка А. Экертом протокола, основанного на запутанных квантах, положила начало модификации существующих протоколов и разработке новых. Например, Ч. Беннет и Ж. Brassar создали протокол BBM92 [21], который является модификацией BB84. Протокол BBM92 использует принцип ЭПР [20–23]. Использование запутанных пар фотонов повышает безопасность обмена данными. В работе [20] подчеркивается схожесть методов BB84 и E91, а также отмечается, что любой вариант BB84 может быть адаптирован для использования источника запутанных квантов.

Новые разработки протоколов квантового распределения ключей направлены на уменьшение количества ошибок при передаче сообщений и повышение устойчивости к атакам. Например, протокол SARG04 (Scarani V. Acin A., Ribordy G., Gisin N.) [20; 23; 24], позволяет уменьшить количество ошибок при использовании двухфотонного источника запутанных квантов, вместо однофотонного. Характеризуется устойчивостью к атакам с разделением по числу фотонов (к PNS-атакам – Photon Number Splitting attack).

Протокол Lo05 [25] был разработан в 2005 г. группой исследователей (Lo H., Ma X., Chen K.). Стандартные состояния Lo05 поляризации аналогичны состояниям BB84. Злоумышленник может подавить однофотонные сигналы, затем разделить на части многофотонный сигнал, выделить одну копию для себя, а вторую отправить получателю информации B2. Поэтому безопасная передача сообщения BB84 возможна только, если на передающей стороне генерируются единичные (одиночные) фотоны, что не всегда возможно. Для обнаружения подслушивания в Lo05 создается набор дополнительных состояний (приманок), интенсивность которых отличается от стандартных. Приманки позволяют обнаружить прослушивание.

Таким образом, разработка и исследование протоколов квантового распределения ключей

продолжается по настоящее время. На основании предложенных протоколов во всем мире создаются программно-аппаратные средства систем и сетей телекоммуникаций с высокой степенью безопасности.

В работах [16; 26] отмечаются корпорации, которые активно проводят исследования и разработку систем и устройств с квантовым распределением ключей КРК (QKD - Quantum Key Distribution): IBM, GAP-Optique, Mitsubishi, Toshiba и др. Проведенные исследования QKD позволили разработать принципиальные схемы связи, создать и испытать опытные линии связи длиной в несколько десятков и сотен км.

В работе [26] также приведено описание созданных компонентов QKD (генератор поляризационно-коррелированных пар фотонов; настольный модуль для счета фотонов; дискретные счетчики одиночных фотонов; модули для коррелированного по времени подсчета фотонов; электрооптические модуляторы; контроллеры поляризации; волоконно-оптические компоненты; рефлектометры для измерения характеристик элементов систем связи). Приведены принципиальные схемы систем связи, ставшие основой современных сетей.

Введение санкций ограничивает использование импортной аппаратуры криптографии. Выход из введенных санкционных ограничений видится в налаживании широкого производства отечественных устройств, систем и сетей КРК.

Разработке устройств и систем квантового распределения ключей КРК (QKD) посвящены материалы множества сайтов, статей в журналах и публикаций материалов конференций, форумов, симпозиумов [27–33]. На состоявшемся в июле 2023 г. Форуме будущих технологий «Вычисления и связь. Квантовый мир» [27] отмечалось, что основными заказчиками систем квантовой криптографии в России являются ОАО «РЖД», ОАО «Газпром», Госкорпорация «Росатом» и другие предприятия и ведомства, которым важны проблемы безопасности передачи информации по сетям связи. Значимость Форума подчеркивается его посещением Президентом России В.В. Путиным.

Правительство РФ определило, что за развитие «Квантовых коммуникаций» ответственным является ОАО «РЖД», которое в настоящее время создает магистральную квантовую сеть протяженностью более 1000 км. До конца 2023 г. ее протяженность должна составить более 2500 км. В течение 2024 г. к квантовой сети должны быть присоединены города Сочи, Волгоград, Самара, Уфа, Пермь, Екатеринбург, Челябинск. В 2025

году планируется построить участок от Уфы до Магнитогорска [27]. Сеть создается только на отечественном оборудовании, в создании сети участвуют операторы связи «Ростелеком», «Транстелеком». Создание сети и разработку системы КРК совместно реализовали ученые из Университета ИТМО и компании ООО «СМАРТС-Кванттелеком» (Санкт-Петербург) [28]. Работа по улучшению характеристик систем с КРК продолжается; например, в Университете ИТМО предложили модификацию системы квантового шифрования с компактным детектором [29]. Разработки [28] являются продолжением и развитием работ компании СМАРТС из г. Самара [30].

В докладе [28] подчеркивается особо важная роль КРК в системах связи специального назначения. Только системы с КРК могут обеспечить криптографическую устойчивость при неограниченных вычислительных ресурсах. Также в работе [28] приведены примеры реализации квантовых криптографических сетей и систем, разработанных компонентов (оптических модуляторов, детекторов одиночных фотонов и др.), приведены основные параметры созданных систем КРК, проведен сравнительный анализ ряда импортных компонентов и отечественных аналогов.

Совместные исследования и разработки компании «СМАРТС-Кванттелеком» с Университетом ИТМО при поддержке ОАО «РЖД» [28] были широко представлены на стендах форума [27]. Особо подчеркнута разработка модуля шифрования «МШ ТР-КРК» в конструктиве 4U. Система реализована с использованием боковых частот.

Следует отметить, что многие ВУЗы РФ совместно с отечественными компаниями активно исследуют, разрабатывают и внедряют в практику технологии квантовых сетей. Результатом совместного проекта МГУ им. М. В. Ломоносова и Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского является межуниверситетская квантовая сеть, первый участок которой проложен между Москвой и Н. Новгородом [27].

На портале выбора технологий и поставщиков (TAdviser) [31; 32] среди отечественных разработчиков программно-аппаратных средств отмечено, что Центр квантовых технологий МГУ им. М. В. Ломоносова и компания «Инфо ТеКС» создали систему выработки и распределения ключей (ViPNet Quantum Security System – ViPNet QSS) на основе протокол квантового распределения ключей КРК. В результате совместного проекта ОАО «Инфо ТеКС» и МГУ им. М. В. Ломоносова в офисе ИнфоТеКС развернута сеть опытной экс-

плуатации. К сети компании подключен сегмент квантовой сети МГУ [33].

Казанский центр квантовых технологий (Russian Quantum Center) Казанского национального исследовательского технического университета имени А.Н. Туполева — КАИ (ККЦ КНИТУ-КАИ) реализовал обмен квантовыми ключами по ВОЛС длиной 143 км [31].

В Центре компетенций НТИ «Квантовые коммуникации» НИТУ Московского института стали и сплавов (МИСИС) предложили повысить уровень защищенности систем и устройств квантовой криптографии за счет оценки уровней шумов в квантовом генераторе случайных чисел [31]. Совместно с Московским техническим университетом связи и информатики (МТУСИ) создана сеть открытого доступа с квантовым распределением ключей [34]. В МТУСИ проводятся исследования по воздействию сильных электромагнитных полей на квантовую связь [31]. Показано, что разряды молнии могут изменять поляризацию передаваемого по ВОЛС кванта. Особенно важно исследовать влияние сильных электромагнитных полей на беспроводные квантовые сети [35].

Заключение

Проведенный обзор показал, что совместные разработки ВУЗов и научно-производственных компаний позволили реализовать планы по созданию квантовых криптографических систем и сетей телекоммуникаций.

Литература

1. Олифер В.Г., Олифер Н.А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: учеб. пособие для вузов. СПб: Питер, 2016. 992 с.
2. Администратор информационной безопасности. Основы криптографии. URL: https://intuit.ru/studies/mini_mba/5398/courses/547/lecture/12387 (дата обращения: 29.09.2023).
3. Семенов Ю.А. Телекоммуникационные и информационные технологии. 6.9. Квантовая криптография. URL: http://book.itep.ru/6/q_crypt.htm (дата обращения: 29.09.2023).
4. Wiesner S. Conjugate Coding // ACM SIGACT News. 1983. Vol. 15, no. 1. P. 78–88. DOI:10.1145/1008908.1008920
5. Bennett C.H., Brassard G. Quantum Cryptography: Public Key Distribution and Coin Tossing // Proceedings of International Conference on Computers, Systems & Signal Processing. India, Bangalore. 1984. P. 175–179.
6. Bennett C.H., Brassard G. Quantum Cryptography: Public Key Distribution and Coin

- Tossing // ACM SIGACT News. 1987. Vol. 18, no. 4. P. 51–53. DOI:10.1145/36068.36070
7. BB84 – Википедия. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/BB84> (дата обращения: 29.09.2023).
 8. Инфо ТеКс ViPNet QSS квантовый телефон. URL: https://www.tadviser.ru/index.php/Продукт:ИнфоТеКс_ViPNet_QSS_Phone_квантовый_телефон (дата обращения: 02.10.2023).
 9. Lopes M., Sarwade N. Cryptography from quantum mechanical viewpoint // International Journal on Cryptography and Information Security (IJCIS). 2014. Vol. 4, no. 2. P. DOI:10.5121/ijcis.2014.4202 13
 10. Слепов Н.Н. Квантовая криптография: передача квантового ключа. Проблемы и решения. Электроника: Наука, Технология, Бизнес. URL: https://www.electronics.ru/files/article_pdf/0/article_705_722.pdf (дата обращения: 01.10.2023).
 11. Радько Н.М., Мокроусов А.Н. Криптографические протоколы: учеб. пособие. Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2006. 104 с.
 12. Слепов Н.Н. Современные технологии цифровых оптоволоконных сетей связи. М.: Радио и связь, 2003. 468 с.
 13. Charles H. Bennett. Quantum Cryptography Using Any Two Nonorthogonal States // Physical Review Letters. 1992. Vol. 68, no. 21. P. 3121–3124.
 14. Протокол B92. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/B92> (дата обращения: 29.09.2023).
 15. Квантовая криптография. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Квантовая_криптография (дата обращения: 29.09.2023).
 16. Стойкое квантовое шифрование – будущее информационной безопасности. URL: <https://integral-russia.ru/2016/06/10/stojkoe-kvantovoe-shifrovanie-budushhee-informatsionnoj-bezopasnosti/> (дата обращения: 29.09.2023).
 17. Artur K. Ekert. Quantum cryptography based on Bell's theorem // Physical Review Letters. 1991. Vol. 67, no. 6. P. 661–663.
 18. Протокол E91. URL: https://ru.frwiki.wiki/wiki/Protocole_E91 (дата обращения: 26.09.2023).
 19. Протокол квантового распределения ключей с использованием ЭПР. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Протокол_квантового_распределения_ключей_с_использованием_ЭПР (дата обращения: 26.09.2023).
 20. A Survey of the Prominent Quantum Key Distribution Protocols. URL: <https://www.cse.wustl.edu/~jain/cse571-07/ftp/quantum/> (дата обращения: 29.09.2023).
 21. Charles H.B., Gilles B. Quantum cryptography: Public key distribution and coin tossing // Theoretical Computer Science. 2014. Vol. 560, no.1. P. 7–11.
 22. BBM92 – протокол квантового шифрования. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/BBM92> (дата обращения: 29.09.2023).
 23. Quantum Cryptography Protocols Robust against Photon Number Splitting Attacks for Weak Laser Pulse Implementations / V. Scarani [et al.] // Physical Review Letters. 2004. Vol. 92, no. 5. P. 057901. DOI: 10.1103/PhysRevLett.92.057901
 24. SARG04 – протокол квантового распределения ключей. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/SARG04> (дата обращения: 26.09.2023).
 25. Протокол Lo05. URL: <https://flirt24.ru/stati/14648-lo05.html> (дата обращения: 26.09.2023).
 26. Системы для квантово-оптических криптографических коммуникаций. Специальные системы. Фотоника. URL: <https://sphotronics.ru/solutions/quantum-cryptography/> (дата обращения: 26.09.2023).
 27. Попов С.А. Квантовые коммуникации выходят на передний план // Первая милья. 2003. №5. P. 34–39. DOI: 10.22184/2070-8963.2023.113.5.34.39
 28. Алексеев А.Л. Разработки ООО «СМАРТС-Кванттелеком» в области квантовых коммуникаций. Квантовые криптографические системы выработки и распределения ключа. URL: https://www.smarts.ru/media/filer_public/9b/68/9b687732-ac4f-4331-8b56-03355411f6ba/smarts_kvanttelekom.pdf (дата обращения: 26.09.2023).
 29. Ученые университета ИТМО предложили модификацию системы квантового шифрования с компактным детектором. URL: <https://news.itmo.ru/ru/news/9580/> (дата обращения: 29.09.2023).
 30. Квантовые коммуникации для защиты линий связи. URL: https://www.smarts.ru/media/filer_public/a8/a0/a8a034b5-bdb6-4762-8c7b-b1778019c77c/22.pdf (дата обращения: 29.09.2023).
 31. Квантовая криптография / шифрование. URL: [https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Квантовая_криптография_\(шифрование\)](https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Квантовая_криптография_(шифрование)). (дата обращения: 29.09.2023).
 32. ViPNet QSS (Quantum Security System). URL: [https://www.tadviser.ru/index.php/%D0%9F%D1%80%D0%BE%D0%B4%D1%83%D0%BA%D1%82:ViPNet_QSS_\(Quantum_Security_System\)](https://www.tadviser.ru/index.php/%D0%9F%D1%80%D0%BE%D0%B4%D1%83%D0%BA%D1%82:ViPNet_QSS_(Quantum_Security_System)) (дата обращения: 29.09.2023).
 33. Гусев Д. Квантовые продукты Инфо-ТеКс.

- Квантовые технологии и безопасность. URL: <https://infotecstechfest.ru/upload/iblock/20f/tvte2bzrgt8sr9fk27myjwo1o4yudjww.pdf>. (дата обращения: 29.09.2023).
34. Первая опытная квантовая сеть в России. URL: https://mtuci.ru/about_the_university/news/4813/ (дата обращения: 29.09.2023).

35. В МТУСИ реализовали беспроводную квантовую связь на базе серийного отечественного оборудования. URL: <https://naked-science.ru/article/column/v-mtusi-realizovali-besprovodnuyu-kvantovuyu> (дата обращения: 29.09.2023).

Получено 02.10.2023

Васин Николай Николаевич, д.т.н., профессор, профессор кафедры сетей и систем связи Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики. 443010, Российская Федерация, г. Самара, ул. Л. Толстого, 23. Тел. +7 917 103-05-44. E-mail: vasin-nn@psuti.ru

QUANTUM CRYPTOGRAPHY METHODS AND INSTRUMENTS

Vasin N.N.

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

Secure data exchange over the network is ensured by the requirements of confidentiality, integrity and availability of information. To meet these requirements, sent data is encrypted on the sending side, and the received information is decrypted on the receiving side. Transmitted message is encrypted according to rules determined by the algorithm and key. Crypto security of encrypted information depends on the key length. Among the encryption algorithms, there are algorithms with a symmetric (private) key and with an asymmetric (public) key. Despite all the advantages of a private key, asymmetric keys are used to deliver it from one user to another (key distribution). However, high-performance quantum computers are capable to decrypt intercepted data. Therefore, modern cryptographic systems use quantum key distribution method. The idea of using quantum bits was proposed in 1970 by S. Wiesner. In 1984, Ch. Bennett and G. Brassard proposed the BB84 protocol. The use of «entangled» quanta for systems with quantum key distribution was offered in 1991 by A. Eckert. All modern quantum cryptography systems are based on these above-mentioned protocols.

Keywords: *data transfer, cryptography, quantum key distribution, polarization, BB84, B92, E91, BBM92 encryption protocols (algorithms), entangled quanta*

DOI: 10.18469/ikt.2023.21.1.09

Vasin Nikolay Nikolayevich, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 23, L. Tolstoy Street, Samara, 443010, Russian Federation; Professor of Networks and Communication Systems Department, Doctor of Technical Sciences, Professor. Tel. +7 917 103-05-44. E-mail: vasin-nn@psuti.ru

References

1. Olifer V.G., Olifer N.A. *Computer networks. Principles, technologies, protocols: Textbook for Universities*. Saint Petersburg: Peter, 2016, 992 p. (In Russ.)
2. Information security administrator. Basics of cryptography. URL: https://intuit.ru/studies/mini_mba/5398/courses/547/lecture/12387 (accessed: 29.09.2023). (In Russ.)
3. Semenov Yu.A. Telecommunications and information technologies. 6.9. Quantum cryptography. URL: http://book.itep.ru/6/q_crypt.htm (accessed: 29.09.2023). (In Russ.)
4. Wiesner S. Conjugate Coding. *ACM SIGACT News*, 1983, vol. 15, no. 1, pp. 78–88. DOI:10.1145/1008908.1008920
5. Bennett C.H., Brassard G. Quantum Cryptography: Public Key Distribution and Coin Tossing. *Proceedings of International Conference on Computers, Systems & Signal Processing*. India, Bangalore, 1984, pp. 175–179.

6. Bennett C.H., Brassard G. Quantum Cryptography: Public Key Distribution and Coin Tossing. *ACM SIGACT News*, 1987, vol. 18, no. 4, pp. 51–53. DOI:10.1145/36068.36070
7. BB84 – Википедия. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/BB84> (accessed: 29.09.2023). (In Russ.)
8. InfoTEX ViPNet QSS quantum phone. URL: https://www.tadviser.ru/index.php/Продукт:Инфо-ТеКс_ViPNet_QSS_Phone_квантовый_телефон (accessed: 02.10.2023). (In Russ.)
9. Lopes M., Sarwade N. Cryptography from quantum mechanical viewpoint. *International Journal on Cryptography and Information Security (IJCIS)*, 2014, vol. 4, no. 2, pp. DOI:10.5121/ijcis.2014.4202 13
10. Slepov N.N. Quantum cryptography: transmission of a quantum key. Problems and solutions. Electronics: Science, Technology, Business. URL: https://www.electronics.ru/files/article_pdf/0/article_705_722.pdf (accessed: 01.10.2023). (In Russ.)
11. Radko N.M., Mokrousov A.N. *Cryptographic protocols: Textbook*. Voronezh: Voronezhskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet, 2006, 104 p. (In Russ.)
12. Slepov N.N. *Modern technologies of digital fiber optic communication networks*. Moscow: Radio i svyaz', 2003, 468 p. (In Russ.)
13. Charles H. Bennett. Quantum Cryptography Using Any Two Nonorthogonal States. *Physical Review Letters*, 1992, vol.68, no. 21, pp. 3121–3124.
14. Protocol B92. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/B92> (accessed: 29.09.2023). (In Russ.)
15. Quantum cryptography. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Квантовая_криптография (accessed: 29.09.2023). (In Russ.)
16. Strong quantum encryption is the future of information security. URL: <https://integral-russia.ru/2016/06/10/stojkoe-kvantovoe-shifrovanie-budushhee-informatsionnoj-bezopasnosti/> (accessed: 29.09.2023). (In Russ.)
17. Artur K. Ekert. Quantum cryptography based on Bell's theorem. *Physical Review Letters*, 1991, vol. 67, no. 6, pp. 661–663.
18. Protocol E91. URL: https://ru.frwiki.wiki/wiki/Protocole_E91 (accessed: 26.09.2023). (In Russ.)
19. Quantum key distribution protocol using EPR. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Протокол_квантового_распределения_ключей_с_использованием_ЭПР (accessed: 26.09.2023). (In Russ.)
20. A Survey of the Prominent Quantum Key Distribution Protocols. URL: <https://www.cse.wustl.edu/~jain/cse571-07/ftp/quantum/> (accessed: 29.09.2023).
21. Charles H.B., Gilles B. Quantum cryptography: Public key distribution and coin tossing. *Theoretical Computer Science*, 2014, vol. 560, no.1, pp. 7–11.
22. BBM92 – quantum encryption protocol. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/BBM92> (accessed: 29.09.2023). (In Russ.)
23. Scarani V. et al. Quantum Cryptography Protocols Robust against Photon Number Splitting Attacks for Weak Laser Pulse Implementations. *Physical Review Letters*, 2004, vol. 92, no. 5, pp. 057901. DOI: 10.1103/PhysRevLett.92.057901
24. SARG04 – quantum key distribution protocol. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/SARG04> (accessed: 26.09.2023). (In Russ.)
25. Protocol Lo05. URL: <https://flirt24.ru/stati/14648-lo05.html> (accessed: 26.09.2023). (In Russ.)
26. Systems for quantum-optical cryptographic communications. Special systems. Photonics. URL: <https://sphotonics.ru/solutions/quantum-cryptography/> (accessed: 26.09.2023). (In Russ.)
27. Popov S.A. Quantum communications come to the fore. *Pervaya milya*, 2003, no.5, pp. 34–39. DOI: 10.22184/2070-8963.2023.113.5.34.39. (In Russ.)
28. Alekseev A.L. Developments of SMARTS-Quanttelecom LLC in the field of quantum communications. Quantum cryptographic systems for key generation and distribution. URL: https://www.smarts.ru/media/filer_public/9b/68/9b687732-ac4f-4331-8b56-03355411f6ba/smarts_kvanttelekom.pdf (accessed: 26.09.2023). (In Russ.)

29. Scientists from ITMO University proposed a modification of the quantum encryption system with a compact detector. URL: <https://news.itmo.ru/ru/news/9580/> (accessed: 29.09.2023). (In Russ.)
30. Quantum communications to protect communication lines. URL: https://www.smarts.ru/media/filer_public/a8/a0/a8a034b5-bdb6-4762-8c7b-b1778019c77c/22.pdf (accessed: 29.09.2023). (In Russ.)
31. Quantum cryptography / encryption. URL: [https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Квантовая_криптография_\(шифрование\)](https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Квантовая_криптография_(шифрование)). (accessed: 29.09.2023). (In Russ.)
32. ViPNet QSS (Quantum Security System). URL: [https://www.tadviser.ru/index.php/%D0%9F%D1%80%D0%BE%D0%B4%D1%83%D0%BA%D1%82:ViPNet_QSS_\(Quantum_Security_System\)](https://www.tadviser.ru/index.php/%D0%9F%D1%80%D0%BE%D0%B4%D1%83%D0%BA%D1%82:ViPNet_QSS_(Quantum_Security_System)) (accessed: 29.09.2023).
33. Gusev D. Quantum products Info-TeKS. Quantum technology and security. URL: <https://infotecstechfest.ru/upload/iblock/20f/tvtc2bzrgt8sr9fk27myjwo1o4yudjww.pdf> (accessed: 29.09.2023). (In Russ.)
34. The first experimental quantum network in Russia. URL: https://mtuci.ru/about_the_university/news/4813/ (accessed: 29.09.2023). (In Russ.)
35. MTUSI implemented wireless quantum communication based on serial domestic equipment. URL: <https://naked-science.ru/article/column/v-mtusi-realizovali-besprovodnyu-kvantovuyu> (accessed: 29.09.2023). (In Russ.)

Received 02.10.2023

ТЕХНОЛОГИИ РАДИОСВЯЗИ, РАДИОВЕЩАНИЯ И ТЕЛЕВИДЕНИЯ

УДК 543.42

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОРОГОВОГО РЕШЕНИЯ ДЛЯ КАНАЛА С РЕЛЕЕВСКИМИ ЗАМИРАНИЯМИ ПРИ ЗОНДИРОВАНИИ СПЕКТРА КОГНИТИВНОГО РАДИО ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ ДЕТЕКТОРОМ

Елисеев С.Н.¹, Степанова Н.В.²

¹*Московский технический университет связи и информатики, Москва, РФ*

²*Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ*

E-mail: fgupnrnsnr@yandex.ru, puhleniw@mail.ru

Характеристики систем зондирования спектра и обнаружение занятости полос спектра в когнитивном радио являются одними из основных аспектов исследования. В случае, когда рассматривается система, в которой первичный пользователь меняется или присутствуют первичные пользователи нескольких типов, используют энергетический детектор. Для работы энергетического детектора основными параметрами, которые определяют вероятностные характеристики обнаружения (вероятность обнаружения пользователя, вероятность ошибки вида «ложная тревога» и вероятность ошибки вида «пропуск цели») будут зависеть от правильного определения порога решений. В данной статье просматривается аналитический подход к определению нормированного порога решений. Цель – проанализировать и определить оптимальное значение порога решений для энергетического детектора в канале с релеевскими замираниями. Рассмотрена система зондирования спектра в когнитивном радио. Определены нормированные величины порогового решения для канала с релеевскими замираниями. Представлены графические иллюстрации результатов анализа и вычислений. Полученные результаты определения пороговых решений являются хорошим приближением для расчета характеристик систем зондирования в когнитивном радио в каналах с релеевскими замираниями, обеспечивая возможность с большей вероятностью определить полосы частот, свободные от первичных пользователей, за счет чего повышается эффективность использования радиочастотного спектра.

Ключевые слова: зондирование спектра, когнитивное радио, Релеевские замирания, энергетический детектор, оптимальная величина порога

Введение

Рост запросов на беспроводные услуги за последние несколько лет иллюстрирует огромный и постоянно растущий спрос бизнес-сообщества, населения и государства. С ростом коммуникаци-

онных приложений спектр становится все более перегруженным. Существующая система назначает разные полосы частот различным пользователям или поставщикам услуг, а для работы в этих полосах необходимо наличие лицензий.

Таким образом, даже если спектр может быть распределен конкретным пользователям, это не обязательно гарантирует, что он используется наиболее эффективно в любое время. Оказывается, что значительная часть радиочастотного спектра может использоваться неэффективно. Это и послужило причиной того, что нелегитимные пользователи могли использовать лицензированные полосы, предполагая, что это не вызовет никаких помех. Когнитивное радио рассматривается как новый подход, который может справиться со спектральными ограничениями. Этот подход предназначен для определения факта использования конкретного сегмента радиочастотного спектра в настоящее время и быстрого перехода к временно неиспользуемому спектру, без вмешательства в передачи других пользователей.

Описание системы зондирования спектра

Зондирование спектра (ЗС) – это ключевая процедура в технологии когнитивного радио с динамическим доступом вторичных пользователей (ВП) к полосе частот, предназначенной для работы лицензированных первичных пользователей (ПП). Зондирование спектра позволяет обнаруживать полосы частот, свободные от сигналов, работающих ПП [1]. Сигнал для ЗС может быть записан как:

$$y_i(n) = \begin{cases} w(n), npu \rightarrow H_0 \\ h_i s(n) + w(n), npu \rightarrow H_1 \end{cases}, \quad (1)$$

где $y_i(n)$ – сигнал, принимаемый i -ым ВП на интервале зондирования; $0 \leq n \leq N$; $w(n)$ – сигнал помехи типа белый гауссов шум (БГШ); h_i – коэффициент передачи по радиоканалу от ПП к i -му ВП; $s(n)$ – сигнал, передаваемый ПП; H_0 – состояние радиоканала в отсутствии сигнала $s(n)$; H_1 – состояние радиоканала при наличии сигнала $s(n)$.

Задача ЗС состоит в следующем: по сигналу $y_i(n)$ на интервале длительностью N обнаружить наличие сигнала $s(n)$. Таким образом, задача ЗС является двухальтернативной задачей статистической теории проверки гипотез [1]. Решение в пользу одной из двух гипотез выносится по правилу:

$$\begin{aligned} Y_i > \lambda & \text{ решение } H_1, \\ Y_i < \lambda & \text{ решение } H_0, \end{aligned} \quad (2)$$

где λ – значение порога решения; Y_i – функционал, обладающий свойствами достаточной статистики, т.е. содержащий в сжатом виде всю информацию, которая имела в сигнале $y_i(n)$ об истинности гипотез H_0 и H_1 [2]. В случае энергетического детектора (ЭД):

$$Y_i = \sum_0^N |y_i(n)|^2. \quad (3)$$

В ряде работ рассматривался критерий оптимизации порога решения в форме суммарного значения вероятности ошибочного решения P_e :

$$P_e = P_m + P_{fa} = P(Y_i < \lambda / H_1) + P(Y_i > \lambda / H_0), \quad (4)$$

где $P_m = 1 - P_d$ – вероятность ошибки вида, «пропуск цели», когда фиксируется, как истинная гипотеза H_0 , при работающем ПП;

$P_d = P(Y_i > \lambda / H_1)$ – вероятность обнаружения, работающего ПП;

P_{fa} – вероятность ошибки вида «ложная тревога», когда фиксируется, как истинная гипотеза H_1 , при отсутствующем сигнале ПП.

В работе [2] получены аналитические выражения λ_0 – оптимального значения порога, которое минимизирует (4) по условию $\frac{\partial P_e}{\partial \lambda} = 0$ в канале с $h_i = const$, т.е. в канале только с аддитивным белым гауссовским шумом (АБГШ). Тогда λ_0 в таком случае – функция трех аргументов N , σ_ω^2 – дисперсии АБГШ и соответственно значение γ отношения сигнал/шум (SNR) равняется:

$$\gamma = |h_i|^2 \times \frac{\sigma_s^2}{\sigma_\omega^2} = |h_i|^2 \times \gamma_T, \quad (5)$$

где σ_s^2 – мощность отсчета сигнала $s(n)$, σ_ω^2 – мощность шумового отсчета, γ_T – отношение сигнал/шум на передающей стороне радиоканала.

$$\lambda_0 = \frac{N\sigma_\omega^2}{2} \left(1 \pm \sqrt{1 + 2\gamma \left(1 + \frac{(1+2\gamma) \ln(1+2\gamma)}{N\gamma^2} \right)} \right), \quad (6)$$

где \ln – натуральный логарифм.

Определение порогового решения для канала с Релеевскими замираниями

Рассматривая каналы с замираниями, требуется в (4) переходить к $\overline{P_m}$ – средней величине вероятности «пропуск цели», являющейся математическим ожиданием P_m , полученным усреднением по распределению случайной величины γ . Для рассматриваемых в работе Релеевских замираний, γ имеет экспоненциальное распределение [1; 2]:

$$f(\gamma) = \frac{1}{\bar{\gamma}} e^{-\gamma/\bar{\gamma}}, \quad (7)$$

где $\bar{\gamma}$ – среднее значение SNR.

Точное выражение для λ_{Op} – значение оптимального порога для усредненного значения $\overline{P_e} = \overline{P_m} + P_{fa}$ (формула 9[2]), получить в компактном виде, пригодном для анализа не удается.

Альтернативный путь заключается в усреднении значений λ_0 из (6) по распределению \mathcal{Y} из (7).

Для упрощения интегрирования и получения более компактного результата учтем следующие обстоятельства:

1) случай низких значений SNR, $\gamma < 1$ проанализирован в [2], где показано, что \bar{P}_e имеет минимум около значения $\lambda_{Op} \approx N\sigma_\omega^2$;

2) вклад слагаемого $\frac{(1+2\gamma)\ln(1+2\gamma)}{N\gamma^2}$ в значения порога (5) для $\gamma \geq 1$ и $N=10$ не превышает 6,6% от точных значений λ_0 , при $N=50$ менее 2,5%, с ростом SNR эта погрешность уменьшается.

В результате приближенное значение нормализованного искомого параметра $\lambda_{On} = \frac{\lambda_{Op}}{N\sigma_\omega^2}$ вычисляется следующим образом:

$$\lambda_{On} = \frac{1}{2} \int_0^\infty (\sqrt{1+2\gamma\bar{\gamma}}) \frac{1}{\gamma} e^{\gamma/\bar{\gamma}} d\gamma =$$

$$= \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \times \frac{\sqrt{a}(\sqrt{\pi} \operatorname{erfc}(\frac{1}{\sqrt{a}}) + \frac{2e^{-\frac{1}{a}}}{\sqrt{a}}) e^{\frac{1}{a}}}{2}, \quad (8)$$

где $a = \bar{\gamma}$. На рисунке 1 представлен график значений по параметру λ_{Op} , рассчитанный по формуле (8).

Результаты

Можно убедиться, что результирующая функция (8) в диапазоне значений аргумента $1 \leq \bar{\gamma} < \infty$ является непрерывной, монотонно-возрастающей выпуклой функцией, и, следовательно, в первом приближении она может быть аппроксимирована $y(\bar{\gamma})$ линейно-ломанной функцией для двух интервалов $\bar{\gamma}$:

$$y(\bar{\gamma}) = k_1\bar{\gamma} + b_1 \quad \text{для} \quad 1 \leq \bar{\gamma} < 11;$$

$$y(\bar{\gamma}) = k_2\bar{\gamma} + b_2 \quad \text{для} \quad 11 \leq \bar{\gamma} < \infty. \quad (9)$$

По логике определения порогового значения, естественно выбрать в (9) критерий наилучшего равномерного приближения [5]: параметры аппроксимирующей функции определяются таким образом, чтобы в интервале приближения наибольшее по абсолютной величине отклонение функции от непрерывной аппроксимирующей функции было бы минимально возможным. При этом наибольшее по абсолютной величине отклонение аппроксимирующего полинома (9) (в данном случае степени $n=1$) от функции (8) будет минимально возможным, если в интервале приближения – это отклонение не менее чем $n+2$ раза принимает свои последовательно чередующиеся предельные зна-

чения $+/-L$. В нашем случае, учитывая выпуклый характер функции (8) имеем $-L, +L, -L$.

Процедуру определения параметров линейно-ломанной аппроксимации (9) рассмотрим подробно на примере интервала $\bar{\gamma}$

Шаг 1. Определим значения коэффициентов в уравнении хорды, пересекающей кривую (8) в точках $\bar{\gamma}=1, 11$.

Шаг 2. Определим Δ – максимальное отклонение значений функции (8) от значений вышеопределенной хорды на интервале $\bar{\gamma}$

Шаг 3. Сдвинем по оси ординат линейную функцию (9), добавив к свободному члену b_1 слагаемое $\Delta/2$.

Полученная линейная функция, как можно видеть, является наилучшей линейной аппроксимацией функции (8)

$$y(\bar{\gamma}) = k_1\bar{\gamma} + b_1 + \Delta/2.$$

В соответствии с исходными данными, приведенными на рисунке 1, были определены значения коэффициентов в уравнениях (9):

$$k_1 = 0,089, b_1 = 1,147, k_2 = 0,0542, b_2 = 1,49.$$

Соответствующий график приведен на рисунке 1а.

Для вычисления усредненного значения вероятности ошибки \bar{P}_e в канале с Релеевскими замираниями воспользуемся формулами (1) и (6) (последняя получена из общей формулы замираний Накагами) из [2], а так же свойствами Q-функции:

$$Q(x) = 1 - Q(-x); Q(x) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right);$$

$$\bar{P}_e = 1 - \exp\left[\frac{1}{2N\bar{\gamma}^2} + \frac{1}{\lambda}(1 - \lambda_{On})\right] \times$$

$$\times Q(\sqrt{N} * (1 - \lambda_{On}) + \frac{1}{N\bar{\gamma}}). \quad (10)$$

Для расчета \bar{P}_e берем λ_{On} , рассчитанный по формуле (8), сначала $N=10$, потом считаем при $N=50$. Полученные графические иллюстрации \bar{P}_e приведены ниже. Из которых можно видеть, что с ростом N , уменьшается вероятность ошибки, так как при больших значениях N увеличивается точность расчетов.

Порог, используемый в алгоритмах обнаружения на основе детектора энергии, зависит от величины мощности шума. Следовательно, небольшая ошибка оценки мощности шума приводит к значительным потерям производительности системы зондирования [6]. В [7] рассмотрена методология определения оценочного значения, чтобы выбрать порог, при котором будет достигнута постоянная частота ложных срабатываний. Ите-

рациональный алгоритм был предложен для поиска порога решения в [8]. Пороговое значение определяется итеративно для достижения указанного уровня достоверности, то есть вероятности ложных срабатываний. Прямые методы, основанные на измерениях энергии, обсуждались в [9] для неизвестных сценариев мощности сигнала. Данный метод адаптивно оценивает уровень шума. Следовательно, он подходит для практических случаев, когда дисперсия шума неизвестна.

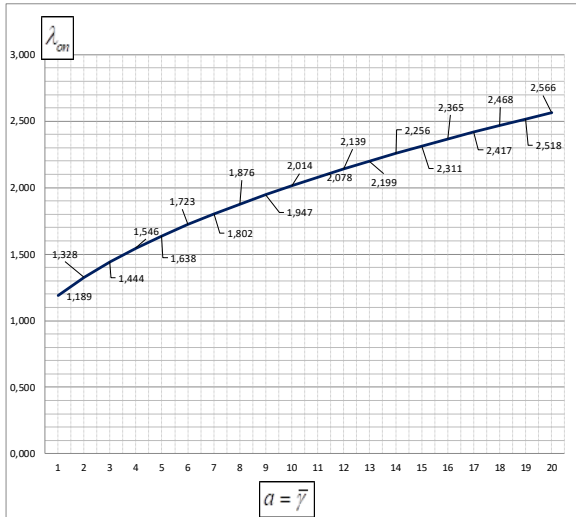


Рисунок 1. График значений по параметру λ_{On}

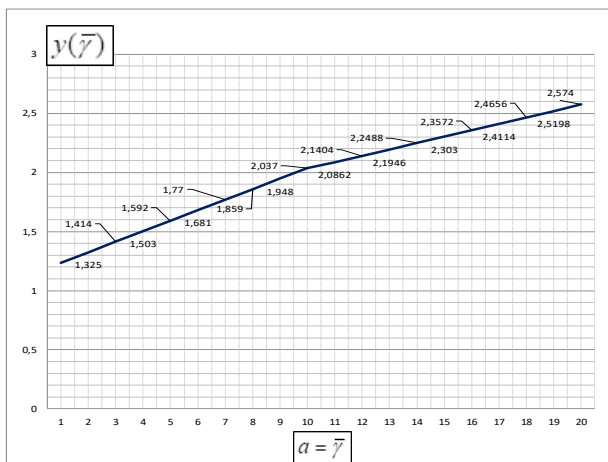


Рисунок 1а. График линейно-ломаной аппроксимации $y(\bar{\gamma})$

Поэтому при получении формулы (7) авторы полагали величину мощности шума σ_ω^2 постоянной детерминированной величиной. В реальных условиях, по целому ряду причин [4; 5] мощность шума может быть определена с некоторой степенью неопределенности.

При анализе характеристик энергетического детектора [4; 5] применяют модель ограниченной неопределенности: точное или номинальное значение σ_ω^2 лежит в ограниченном интервале:

$$\frac{\sigma_\omega^2}{\rho} \leq \sigma_\omega^2 \leq \rho \sigma_\omega^2, \quad (11)$$

где ρ – параметр, характеризующий степень неопределенности σ_ω^2 .

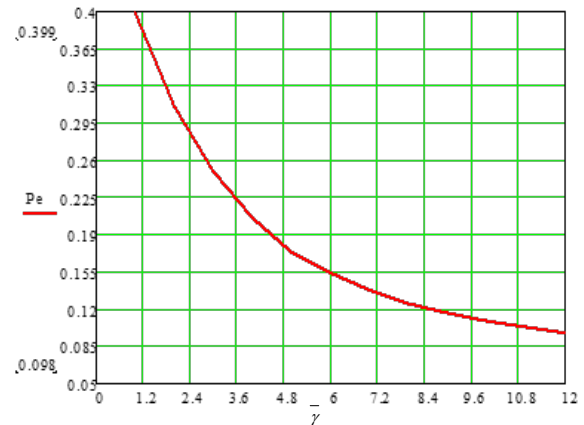


Рисунок 2. График значения вероятности ошибки в канале с Релеевскими замираниями при N=10

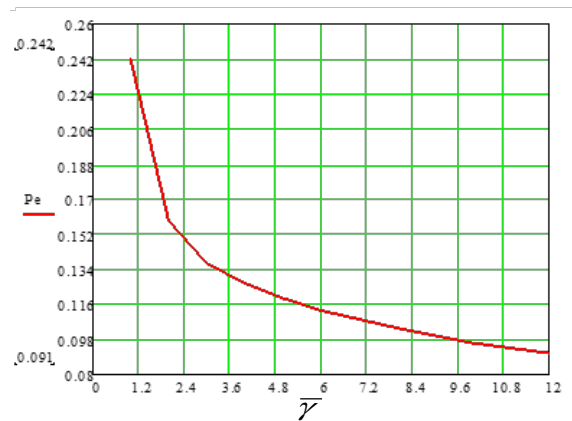


Рисунок 3. График значения вероятности ошибки в канале с Релеевскими замираниями при N=50

Распределение случайной величины σ_ω^2 подчиняется равномерному закону распределения [5]. Таким образом, значения $\bar{\gamma}$ в (10) должны рассматриваться в интервале $\frac{\bar{\gamma}}{\rho} \leq \bar{\gamma} \leq \rho \bar{\gamma}$.

Ниже приведены графики значений вероятности ошибки в канале с Релеевскими замираниями на рисунке 4:

- 1) \bar{P}_e при N=10; $\bar{\gamma} = 1 \dots 12$;
- 2) $\bar{P}_e 1$ при N=10; $\bar{\gamma} = \bar{\gamma} / \rho$, где $\rho = 1,5$;
- 3) $\bar{P}_e 2$ при N=10; $\bar{\gamma} = \rho \bar{\gamma}$, где $\rho = 1,5$.

На рисунке 5 приведены графики значений вероятности ошибки в канале с Релеевскими замираниями:

- \bar{P}_e при N=50; $\bar{\gamma} = 1 \dots 12$;
- $\bar{P}_e 1$ при N=50; $\bar{\gamma} = \bar{\gamma} / \rho$, где $\rho = 1,5$;
- $\bar{P}_e 2$ при N=50; $\bar{\gamma} = \rho \bar{\gamma}$, где $\rho = 1,5$.

По графикам на рисунке 4 видно, что более низкая вероятность ошибки будет \bar{P}_e2 при $\bar{\gamma} = \rho\bar{\gamma}$ и \bar{P}_e при $\bar{\gamma} = 1 \dots 12$. Значения у них почти одинаковые, чего нельзя сказать про \bar{P}_e1 . Здесь значение вероятности ошибки больше. Проанализировав следующий график, на рисунке 5, и сравнив его с первым графиком на рисунке 4, можно отметить, что при одинаковых λ_{Op}, ρ , вероятность ошибки меньше при большем значении N . Это связано с тем, что чем больше мы берем точек, тем более достоверным и точным получается результат. Также при большем значении ρ и в интервале от $\bar{\gamma} \leq \rho\bar{\gamma}$ вероятностная характеристика лучше.

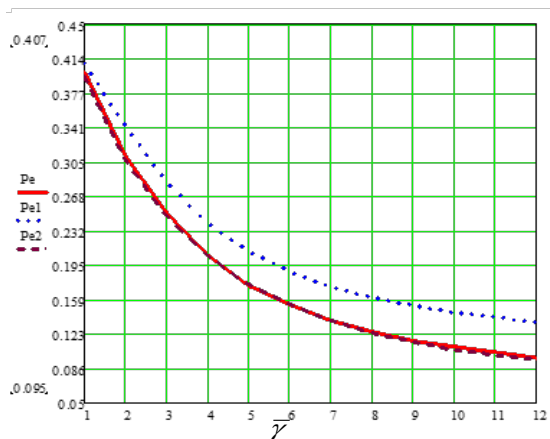


Рисунок 4. Графики значений вероятности ошибки в канале с Релеевскими замиряниями, при $N=10$

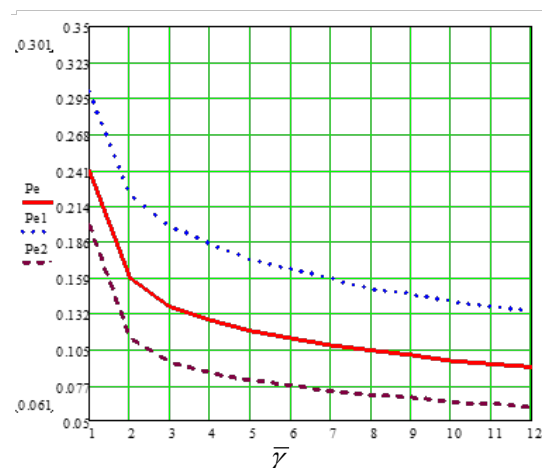


Рисунок 5. Графики значений вероятности ошибки в канале с Релеевскими замиряниями: при $N=50$

Заключение

Зондирование спектра на основе детектора, требующее минимум априорных сведений о ПП, демонстрирует весьма устойчивое качество характеристик обнаружения в широком диапазоне значений SNR. Изменения в этом показателе могут быть обусловлены как ограниченной точностью мониторинга свойств канала и мощности шума, так и объективной природой нестационарности ра-

диоокружения [10]. Полученные в данной работе результаты позволяют прогнозировать диапазон ожидаемых характеристик обнаружения и граничные их значения в сценариях «наихудшего случая».

Литература

1. Letaif K., Zhang W. Cooperative Communications for Cognitive Radio Networks // Proceeding of the IEEE. 2009. Vol. 97, no. 5. P. 878–893.
2. Atapattu S., Tellambura Ch., Jiang H. Spectrum Sensing via Energy Detector in Low SNR // Proceeding on IEEE International Conference on Communications. 2011. DOI:10.1109/ICC.2011.5963316
3. Eliseev S.N., Stepanova N.V., Trifonova L.N. Cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks with Rayleigh fading // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы (WECOMF-2020): материалы XXIII международной научной конференции. Санкт-Петербург, 2020. С. 224–235.
4. Najafabadi Z.H. Impact of wireless channel uncertainty upon M-ary distributed detection systems // Stars library university of Central Florida, 2016. P. 1–29.
5. Liu Y., Li F., Hu G. Performance Analysis of Cooperative Spectrum Sensing under Noise Uncertainty // Applied Mathematics and Information Sciences. 2012. no. 6-2S. P. 587S–593S.
6. Sahai A., Hoven N., Tandra R. Some fundamental limits on cognitive radio // Allerton Conference on Communication, Control and Computing. Monticello, Illinois, 2004. P. 1–11.
7. A scalable dynamic spectrum allocation system with interference mitigation for teams of spectrally agile software defined radios/ M.P. Olivieri [et al.] // IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks. Baltimore, 2005. P. 170–179.
8. A framework for RF spectrum measurements and analysis/ F. Weidling [et al.] // IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks. Baltimore, 2005. Vol. 1. P. 573–576.
9. Spectrum sensing with forward methods/ J. Lehtomäki [et al.] // IEEE Military Communications Conference. Washington, 2006. P. 1–7.
10. Tang H. Some physical layer issues of wide-band cognitive radio systems // IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks. Baltimore, 2005. P. 151–159.

Получено 16.05.2023

Елисеев Сергей Николаевич, д.т.н., профессор, профессор кафедры теории электрических цепей Московского технического университета связи и информатики. 123423, Российская Федерация, г. Москва, Северо-Западный Административный округ, ул. Народного Ополчения, 32. Тел. +7 937 649 06 35. E-mail: fgupnrsnr@yandex.ru

Степанова Наталья Вениаминовна, старший преподаватель кафедры радиоэлектронных систем Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики. 443010, Российская Федерация, г. Самара, ул. Л. Толстого, 23. Тел. +7 917 115 71 50. E-mail: puhleniw@mail.ru

DETERMINATION OF THE THRESHOLD SOLUTION FOR A CHANNEL WITH RAY-LEIG FADING WHEN PROBING THE COGNITIVE RADIO ENERGY DETECTOR SPECTRUM

Eliseev S.N.¹, Stepanova N.V.²

¹*Moscow technical university of communications and informatics, Moscow, Russian Federation*

²*Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russian Federation*

E-mail: fgupnrsnr@yandex.ru, puhleniw@mail.ru

Spectrum sensor system performance and detection of spectrum band occupancy in cognitive radio are among of the main research aspects. When considering a system in which the primary user changes or there are multiple types of primary users, an energy detector is used. For energy detector operation, the main parameters that determine probabilistic characteristics of detection (probability of user detection, probability of a «false alarm» error and probability of a «missing target» error) will depend on the correct determination of the decision threshold. This article reviews an analytical approach to the normalized decision threshold determination. The purpose is to analyze and determine the optimal decision threshold value for an energy detector in a channel with Rayleigh fading. A spectrum sensing system in cognitive radio is considered. Normalized values of the threshold solution for a channel with Rayleigh fading are determined. Graphic illustrations of the analysis results and calculations are presented. Results obtained for determining threshold solutions may be considered a proper approximation for calculating the characteristics of sensing systems in cognitive radio in channels with Rayleigh fading, providing the opportunity to determine frequency bands free of primary users more likely, thereby increasing the efficiency of use of the radio frequency spectrum.

Keywords: *spectrum sensing, cognitive radio, Rayleigh fading, energy detector, optimal threshold value*

DOI: 10.18469/ikt.2023.21.1.10

Eliseev Sergey Nikolaevich, Moscow Technical University of Communications and Informatics, 32, People's Militia Street, Moscow, 123423, Russian Federation; Professor of Electric Circuit Theory Department, Doctor of Technical Sciences, Professor. Tel. +7 937 649 06 35. E-mail: fgupnrsnr@yandex.ru

Stepanova Natalya Veniaminovna, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 23, L. Tolstoy Street, Samara, 443010, Russian Federation; Senior teacher of Radioelectronic Systems the Department. Tel. +7 917 115 71 50. E-mail: puhleniw@mail.ru

References

1. Letaif K., Zhang W. Cooperative Communications for Cognitive Radio Networks. *Proceeding of the IEEE*, 2009, vol. 97, no. 5, pp.878–893.
2. Atapattu S., Tellambura Ch., Jiang H. Spectrum Sensing via Energy Detector in Low SNR. *Proceeding on IEEE International Conference on Communications*, 2011, DOI:10.1109/ICC.2011.5963316.
3. Eliseev S.N., Stepanova N.V., Trifonova L.N. Cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks with Rayleigh fading. *Volnovaya elektronika i infokommunikacionnye sistemy*

- (WECNF-2020): *materialy XXIII mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii*. Saint Petersburg, 2020, pp. 224–235. (In Russ.)
4. Najafabadi Z.H. Impact of wireless channel uncertainty upon M-ary distributed detection systems. Stars library university of Central Florida, 2016, pp. 1–29.
 5. Liu Y., Li F., Hu G. Performance Analysis of Cooperative Spectrum Sensing under Noise Uncertainty. *Applied Mathematics and Information Sciences*, 2012, no. 6-2S, pp.587S–593S.
 6. Sahai A., Hoven N., Tandra R. Some fundamental limits on cognitive radio. *Allerton Conference on Communication, Control, and Computing*. Monticello, Illinois, 2004, pp. 1–11.
 7. Olivieri M.P. et al. A scalable dynamic spectrum allocation system with interference mitigation for teams of spectrally agile software defined radios. *IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*. Baltimore, 2005, pp.170–179.
 8. Weidling F. et al. A framework for RF spectrum measurements and analysis. *IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*. Baltimore, 2005, vol. 1, pp. 573–576.
 9. Lehtomäki J. et al. Spectrum sensing with forward methods. *IEEE Military Communications Conference*. Washington, 2006, pp. 1–7.
 10. Tang H. Some physical layer issues of wide-band cognitive radio systems. *IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*. Baltimore, 2005, pp.151–159.

Received 16.05.2023

УДК 681.518.5

МЕТОД ИТЕРАЦИОННОГО СОВМЕЩЕНИЯ ТЕЛЕВИЗИОННЫХ СИГНАЛОВ НА БАЗЕ ЛИНЕАРИЗАЦИИ ДЛЯ СИСТЕМ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

Диязитдинов Р.Р.

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ

E-mail: r.diyazitdinov@psuti.ru

Представлен метод совмещения телевизионных сигналов для систем технического зрения на базе линеаризации. Актуальность разработанного метода заключается в уменьшении погрешности при совмещении сигналов на фоне помех, возникающих из-за изменения условий освещенности, а также в обеспечении высокой скорости обработки. Показано, что идея совмещения заключается в замене в математической модели совмещаемых сигналов тригонометрических функций на приближенные значения, и в добавлении в модель двух переменных – аддитивной и мультипликативной составляющей. Оценка всех параметров совмещения проводится в результате решения системы линейных уравнений, которая определяется в результате разложения совмещаемого сигнала в ряд Тейлора. Проведен эксперимент, показывающий корректное совмещение телевизионных сигналов с помощью предложенного метода, а также сделано сравнение с методом полного перебора по показателям погрешности измерения и скорости обработки. Отмечено, что работа будет полезна для разработчиков измерительных систем технического зрения, в которых обработка ведется в режиме реального времени.

Ключевые слова: совмещение, итерационный, телевизионный сигнал, линеаризация, техническое зрение, оптический поток, аддитивная и мультипликативная составляющая

Введение

Обработка сигналов систем видеонаблюдения, и, в том числе, технического зрения, является перспективным направлением в науке и промышленной технике.

Телевизионный сигнал обладает высокой информативностью по сравнению с сигналами от датчиков (акселерометров, гироскопов, одометров и т.д.). Эта особенность позволяет исполь-

зовать телевизионные сигналы для построения интеллектуальных систем технического зрения. Одной из важных задач при обработке является совмещение сигналов. Эта задача возникает при распознавании объектов, слежении за движущимися объектами, определении их положения, формировании панорамных изображений, сжатии видеосигналов и т.д.

Развитие современной вычислительной техники позволяет решать многие задачи обработки

в режиме реального времени. По этой причине разработчики методов и алгоритмов совмещения телевизионных сигналов сосредотачивают свои усилия не только на уменьшении погрешности, но и на оптимизации скорости обработки, чтобы выполнить это требование.

Релевантные работы

Анализ работ по обработке сигналов позволил выделить несколько направлений исследований в области совмещения.

Первое направление связано с классической теорией оценивания параметров с помощью проверки всех гипотез (переборные методы). Известные параметры оцениваются путем сравнения телевизионных сигналов по минимуму среднеквадратичного отклонения [1–4]. Другой почти аналогичный критерий основан на определении максимального значения коэффициента корреляции [2; 3; 5]. Если среди неизвестных параметров есть угол разворота, то для использования переборных алгоритмов, необходимо генерировать множество шаблонов [2], каждый из которых будет соответствовать некоторому углу поворота [6; 7]. Переборные методы характеризуются низкой погрешностью измерений. Однако их существенным недостатком является наличие высоких требований к вычислительной мощности.

Одним из способов повышения скорости обработки является Фурье-преобразование, которое позволяет уменьшить время расчета среднеквадратичного отклонения и корреляции [8–14].

Для оценки смещений достаточно использования одномерного преобразования Фурье над проекциями изображения на координатные оси [12]. Так как при сдвиге изображения модуль преобразования Фурье меняться не будет, а будет меняться только фазовая составляющая, то этот метод получил название фазовой корреляции изображений [11]. В работе [13] предлагается модификация метода фазовой корреляции, который позволяет проводить совмещение с учетом смещения и угла поворота.

В ряде работ [10; 14; 15] для совмещения изображений по смещению и углу поворота также используется преобразование Фурье. Для упрощения процедуры оценки поворота производится переход к логарифмически-полярной системе координат. Однако эти подходы ограничиваются совмещением с точностью, сравнимой с размером пикселя.

Другое направление совмещения основано на предположении, что на изображении можно выделить особые точки, которым в соот-

ветствии ставятся особые точки на эталонном изображении [16–18]. Параметры совмещения определяются путем решения системы уравнений. Недостатком этого подхода является высокая чувствительность к шуму, что не позволяет работать с реальными изображениями, которые подвержены не только аддитивным шумам и линейным искажениям, но и различного рода нелинейным искажениями (засветкам) [16; 18].

В основе исследований, связанных с линеаризацией, лежит идея разложения обрабатываемого сигнала в ряд Тейлора по аргументам, соответствующим параметрам совмещения. Для формирования линейной зависимости производится отбрасывание всех элементов ряда выше первого порядка. В результате формируется система линейных уравнений, решение которой определяет неизвестные параметры совмещения.

Основоположниками этого метода для совмещения телевизионных сигналов являются ученые Lucas и Kanade [19; 20]. Математическая модель для описания обрабатываемых сигналов с одной стороны является простой, а с другой стороны – удовлетворительно описывающей реальные геометрические трансформации для совмещения. Это определило ее повсеместное использование в различных научных и практических исследованиях. В научной литературе метод Lucas-Kanade часто называется методом оценки оптического потока (optical flow).

Существуют различные модификации метода:

- более точное вычисление частных производных за счет использования полиномов [22];
- удаление импульсных помех за счет анализа данных в смежных фрагментах изображения;
- оценка угла поворота [23–25] за счет использования приближенных значений тригонометрических функций.

В этой статье рассматривается задача, которая не рассматривалась в других исследованиях: одновременная оценка трех параметров (двух смещений вдоль координатных осей и угла поворота) на фоне помех, возникающих из-за изменения условий освещенности (аддитивная и мультипликативная составляющая). Для решения этой задачи был разработан метод на базе линеаризации, который является обобщением работ [19; 20; 23–25].

Метод совмещения телевизионных сигналов при влиянии аддитивной и мультипликативной помех.

Допустим $f(x, y)$ и $g(x, y)$ – это обрабатываемые сигналы. Для цифровых телевизионных сигналов (изображений) аргументы (x, y) принимают дискретные значения (x_i, y_j) .

Сигналы $f(x, y)$ и $g(x, y)$ получены в результате регистрации некоторого исходного сигнала $s(x, y)$ в различные моменты времени. Параметры геометрической трансформации, определяются тремя параметрами: двумя смещениями вдоль осей, углом поворота, а яркостные характеристики из-за изменения освещенности описываются: аддитивной и мультипликативной составляющей.

Таким образом, можно записать:

$$f(x_i, y_i) = s(x_i, y_i) + k(x_i, y_i), \quad (1)$$

$$g(x_i, y_i) = \lambda s(x'_i, y'_i) + \gamma + m(x_i, y_i), \quad (2)$$

где $x'_i = x_i \cdot \cos(\alpha) - y_i \cdot \sin(\alpha) + h$,

$$y'_i = x_i \cdot \sin(\alpha) + y_i \cdot \cos(\alpha) + p,$$

h, p – смещения, которые необходимо оценить,

α – угол поворота, который необходимо оценить,

λ – мультипликативная составляющая,

γ – аддитивная составляющая,

$k(x_i, y_i)$, $m(x_i, y_i)$ – реализации шума.

В формулу (1) подставим значения x'_i, y'_i вместо x, y и выразим функцию $s(x, y)$:

$$s(x'_i, y'_i) = f(x'_i, y'_i) - k(x'_i, y'_i), \quad (3)$$

Подставим выражение (3) в формулу (2), получим:

$$g(x_i, y_i) = \lambda [f(x'_i, y'_i) - k(x'_i, y'_i)] + \gamma + m(x_i, y_i).$$

После подстановки выражений для x'_i, y'_i и введения обозначения:

$$n(x_i, y_i) = -\lambda k(x'_i, y'_i) + m(x_i, y_i),$$

можно записать:

$$g(x_i, y_i) = \lambda \cdot f(x_i \cdot \cos(\alpha) - y_i \cdot \sin(\alpha) + h,$$

$$x_i \cdot \sin(\alpha) + y_i \cdot \cos(\alpha) + p) + \gamma + n(x_i, y_i).$$

Если положить, что угол α мал, то можно сделать следующую замену:

$\cos(\alpha) \approx 1$, $\sin(\alpha) \approx \alpha$, тогда можно записать:

$$\lambda \cdot f(x_i \cdot \cos(\alpha) - y_i \cdot \sin(\alpha) + h,$$

$$x_i \cdot \sin(\alpha) + y_i \cdot \cos(\alpha) + p) + \gamma \approx$$

$$\approx \lambda \cdot f(x_i - y_i \cdot \alpha + h, x_i \cdot \alpha + y_i + p) + \gamma =$$

$$= \lambda f(x_i + (h - y_i \cdot \alpha), y_i + (p + x_i \cdot \alpha)) + \gamma.$$

Раскладывая функцию f в окрестности точки (x_i, y_i) , получим:

$$f(x_i + (h - y_i \cdot \alpha), y_i + (p + x_i \cdot \alpha)) \approx$$

$$\approx f(x_i, y_i) + \frac{\partial f(x_i, y_i)}{\partial x} \cdot (h - y_i \cdot \alpha) +$$

$$+ \frac{\partial f(x_i, y_i)}{\partial y} \cdot (p + x_i \cdot \alpha).$$

Вводя обозначения:

$$q(x_i, y_i) = \frac{\partial f(x_i, y_i)}{\partial x} \approx \frac{f(x_{i+1}, y_i) - f(x_i, y_i)}{x_{i+1} - x_i}$$

$$r(x_i, y_i) = \frac{\partial f(x_i, y_i)}{\partial y} \approx \frac{f(x_i, y_{i+1}) - f(x_i, y_i)}{y_{i+1} - y_i},$$

получаем результирующее выражение:

$$g(x_i, y_i) = \lambda \cdot f(x_i \cdot \cos(\alpha) - y_i \cdot \sin(\alpha) + h,$$

$$x_i \cdot \sin(\alpha) + y_i \cdot \cos(\alpha) + p) + \gamma \approx$$

$$\approx \lambda f(x_i, y_i) + \lambda q(x_i, y_i) \cdot (h - y_i \cdot \alpha) +$$

$$+ \lambda r(x_i, y_i) \cdot (p + x_i \cdot \alpha) + \gamma.$$

Для оценки параметров h, p, α, λ и γ воспользуемся методом наименьших квадратов (МНК):

$$F = \sum_{i=1}^N (g(x_i, y_i) - \lambda f(x_i, y_i) - \lambda q(x_i, y_i) \times$$

$$\times (h - y_i \cdot \alpha) - \lambda r(x_i, y_i) \cdot (p + x_i \cdot \alpha) - \gamma)^2 \rightarrow \min.$$

Решение определяется путем приравнивания частных производных к нулю. В результате определяется система линейных уравнений (смотреть *).

Система линейных уравнений решается относительно $h, p, \mu, \varepsilon, \varphi$.

Итерационная обработка

Так как для оценки параметров совмещения использовалось разложение в ряд Тейлора, то полученное решение будет содержать методическую погрешность. Она возникает из-за отбрасывания элементов ряда выше первого порядка.

Чтобы уменьшить методическую погрешность, исходный метод был модифицирован:

(*)

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda \sum_{i=1}^N f(x_i, y_i) \cdot f(x_i, y_i) + \mu \sum_{i=1}^N q(x_i, y_i) \cdot f(x_i, y_i) + \varepsilon \sum_{i=1}^N r(x_i, y_i) \cdot f(x_i, y_i) + \varphi \sum_{i=1}^N u(x_i, y_i) \cdot f(x_i, y_i) - \gamma \sum_{i=1}^N f(x_i, y_i) = \sum_{i=1}^N (g(x_i, y_i) \cdot f(x_i, y_i)); \\ \lambda \sum_{i=1}^N f(x_i, y_i) \cdot q(x_i, y_i) + \mu \sum_{i=1}^N q(x_i, y_i) \cdot q(x_i, y_i) + \varepsilon \sum_{i=1}^N r(x_i, y_i) \cdot q(x_i, y_i) + \varphi \sum_{i=1}^N u(x_i, y_i) \cdot q(x_i, y_i) - \gamma \sum_{i=1}^N q(x_i, y_i) = \sum_{i=1}^N (g(x_i, y_i) \cdot q(x_i, y_i)); \\ \lambda \sum_{i=1}^N f(x_i, y_i) \cdot r(x_i, y_i) + \mu \sum_{i=1}^N q(x_i, y_i) \cdot r(x_i, y_i) + \varepsilon \sum_{i=1}^N r(x_i, y_i) \cdot r(x_i, y_i) + \varphi \sum_{i=1}^N u(x_i, y_i) \cdot r(x_i, y_i) - \gamma \sum_{i=1}^N r(x_i, y_i) = \sum_{i=1}^N (g(x_i, y_i) \cdot r(x_i, y_i)); \\ \lambda \sum_{i=1}^N f(x_i, y_i) \cdot u(x_i, y_i) + \mu \sum_{i=1}^N q(x_i, y_i) \cdot u(x_i, y_i) + \varepsilon \sum_{i=1}^N r(x_i, y_i) \cdot u(x_i, y_i) + \varphi \sum_{i=1}^N u(x_i, y_i) \cdot u(x_i, y_i) - \gamma \sum_{i=1}^N u(x_i, y_i) = \sum_{i=1}^N (g(x_i, y_i) \cdot u(x_i, y_i)); \\ \lambda \sum_{i=1}^N f(x_i, y_i) + \mu \sum_{i=1}^N q(x_i, y_i) + \varepsilon \sum_{i=1}^N r(x_i, y_i) + \varphi \sum_{i=1}^N u(x_i, y_i) - \gamma \cdot N = \sum_{i=1}^N g(x_i, y_i); \end{array} \right.$$

где $u(x_i, y_i) = -q(x_i, y_i) \cdot y_i + r(x_i, y_i) \cdot x_i$, $\mu = h \cdot \lambda$, $\varepsilon = p \cdot \lambda$, $\varphi = \alpha \cdot \lambda$.

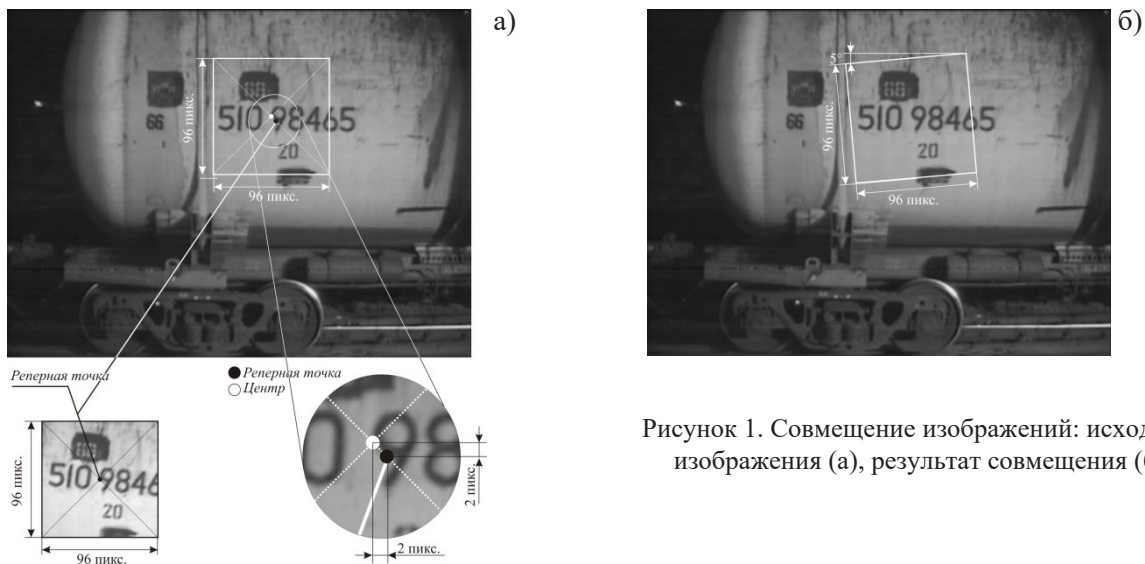


Рисунок 1. Совмещение изображений: исходные изображения (а), результат совмещения (б)

была добавлена итерационная обработка. Суть итерационной обработки заключается в пересчете сигнала $g(x, y)$ в соответствии с вычисленными параметрами h , p и α :

$$\begin{aligned} xn_i &= x_i \cdot \cos(\alpha) - y_i \cdot \sin(\alpha) + h, \\ yn_i &= x_i \cdot \sin(\alpha) + y_i \cdot \cos(\alpha) + p. \end{aligned}$$

Новый сигнал $gn(x, y) = g(xn, yn)$ и исходный сигнал $f(x, y)$ обрабатывается повторно. В результате, погрешность оценки параметров резко уменьшается. В ходе экспериментов было установлено, что пяти итераций достаточно и дальнейшее увеличение не приводит к существенному уменьшению погрешности.

Эксперимент

Для проверки разработанного метода был проведен эксперимент с использованием телевизионных сигналов, полученных в системе технического зрения для измерения скорости движения протяженных объектов (рисунок 1).

На рисунке 1а показаны два изображения: на верхнем изображении квадратом выделен фрагмент изображения – это первый сигнал для обработки, а нижнее изображение – это второй сигнал.

Также на рисунке 1а отмечены реперные точки (точки, соответствующие друг другу) и центры фрагментов. У первого сигнала центр и реперная точка не совпадают в отличие от второго сигнала.

Разница между координатами центра и реперной точкой, фактически, определяет смещение, которое необходимо оценить.

Также из рисунка 1а видно, что телевизионные сигналы отличаются поворотом и яркостными характеристиками.

На рисунке 1б показан результат совмещения.

Как можно видеть, разработанный метод по-

зволяет совместить изображения с высокой точностью.

Погрешность совмещения телевизионных сигналов

Для оценки погрешности совмещения при аддитивном шуме было проведено численное моделирование. Оно заключалось в добавлении помехи к каждому элементу телевизионного сигнала. Помеха имела нормальное распределение с задаваемым среднеквадратичным отклонением (СКО) σ_n . Полученные зашумленные телевизионные сигналы совмещались, а оцениваемые параметры совмещения сравнивались с действительными значениями (получены при нулевом СКО).

Погрешностью параметров будет являться значение среднеквадратичной величины (СКВ):

$$СКВ = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^L (\hat{h} - h)^2 \right) / L},$$

где \hat{h} – оценка параметра, h – действительное значение, L – количество моделирований.

Графики измерений для нескольких сочетаний аддитивной и мультипликативной составляющей представлены на рисунках 2, 3.

Точность оценки совпала с точностью оценки по методу полного перебора. Для получения прецизионной точности с помощью переборного метода, шаг дискретизации выбирался в пять раз меньше, чем размер пикселя, а для восстановления субпиксельных значений была использована линейная интерполяция. Для повышения скорости обработки переборного метода использовалось преобразование Фурье.

Преимущество разработанного метода по сравнению с переборным заключается в умень-

шении времени обработки. Для примера, приведенного в статье, время обработки с помощью разработанного метода было приблизительно в 15 раз меньше, чем с помощью переборного.

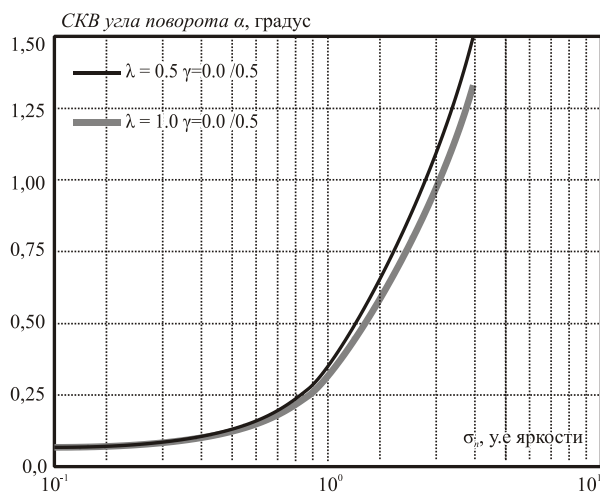


Рисунок 2. Погрешность оценки угла

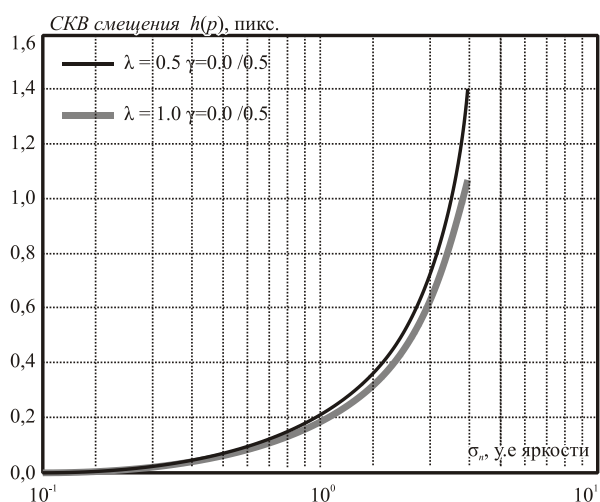


Рисунок 3. Погрешность оценки смещения

Исходя из проведенных исследований зависимости погрешности параметров от мощности шума, можно сделать вывод, что погрешность оценки параметров уменьшается с ростом мультипликативной помехи. Это объясняется тем, что эквивалентное отношение сигнал/шум возрастает с ростом мультипликативной помехи, а аддитивная помеха не оказывает существенного влияния на оценку параметров.

При мощности шума $\sigma_n = 1$ у.е. яркости (при градациях от 0 до 255 у.е.) по параметрам $h(p)$ СКВ составляет 0,2 пикселя, по углу поворота α составляет $0,3^\circ$.

Заключение

Разработанный метод оценки параметров для совмещения телевизионных сигналов является обобщением метода Lucas-Kanade.

С точки зрения погрешности оценки параметров разработанный метод совпадает с методом перебора, однако скорость обработки приблизительно в 15 раз выше.

Разработанный метод направлен на решение задачи прецизионного совмещения по осям координат и углу разворота при влиянии аддитивных и мультипликативных помех.

Разработанный метод может быть использован для задач прецизионной оценки параметров в системах технического зрения, для которых предъявляются требования обработки данных в режиме реального времени.

Литература

1. Совмещение изображений в условиях неопределенности / В.А. Андросов [и др.] // Зарубежная радиоэлектроника. 1985. № 4. С. 32–41.
2. Методы оценивания взаимного смещения фрагментов изображений / А.В. Губанов [и др.] // Автометрия. 1988. № 3. С. 70–73.
3. Панкова Т.Л., Резник А.Л. Эффективность алгоритмов прецизионного совмещения цифровых изображений // Автометрия. 1991. № 5. С. 39–43.
4. Liu M., Delbruck T. Block-matching optical flow for dynamic vision sensors: Algorithm and FPGA implementation // IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS). 2017. P. 1–4.
5. Васин Н.Н., Куринский В.Ю. Обработка видеосигналов для измерения скорости движения железнодорожных вагонов на сортировочной горке // Компьютерная оптика. 2005. № 27. С. 185–188.
6. Артюшенко В.М., Воловач В.И. Оценка информационных параметров сигнала на фоне аддитивно-мультипликативных помех с произвольным распределением // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2018. Т. 21, № 4. С. 58–62.
7. Дязитдинов Р.Р. Методы различения и оценки параметров оптических сигналов: монография. Самара: ПГУТИ, 2019. 139 с.
8. Brown L.G. A survey of image registration techniques // ACM Computing Surveys. 1992. no. 24(4). P. 325–376.
9. Barnea D.I., Silverman H.F. A class of algorithms for fast digital registration // IEEE Transactions on Computers. 1972. Vol. C-21. P.179–186.
10. Wolberg G., Zokai S. Robust image registration using log-polar transform // Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing. 2000. Vol. 1. P. 493–196.

11. Kuglin C.D., Hines D.C. The phase correlation image alignment method // Proceedings International Conference on Cybernetics and Society. 1975. P. 163–165.
12. Alliney S., Morandi C. Digital image registration using Projections // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1986. Vol. PAMI-8, no. 2. P.222–233.
13. De Castro E., Morandi C. Registration of translated and rotated images using finite fourier transforms // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1987. Vol. PAMI-9, no. 3. P. 700–703.
14. Reddy B.S., Chatterji B.N. An FFT-based technique for translation, rotation, and scale-invariant image registration // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1996. Vol 5, no. 8. P.1266–1270.
15. An IDL/ENVI implementation of the FFT-based algorithm for automatic image registration / H. Xie [et al.] // Computer and Geosciences. 2003. no. 29. P. 1045–1055.
16. Форсайт Д., Понс Ж. Компьютерное зрение. Современный подход. М.: Вильямс, 2004. 928 с.
17. Прэтт У. Цифровая обработка изображений / пер. с англ. М.: Мир, 1982. 312 с.
18. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений / пер. с англ. М.: Техносфера, 2005. 1070 с.
19. Lucas B.D., Kanade T. An iterative image registration technique with an application to stereo vision // Proceedings Seventh International Joint Conference on Artificial Intelligence. 1981. P. 674–679.
20. Lucas B.D. Generalized Image Matching by the Method of Differences. Pittsburgh: Carnegie-Mellon University publisher, 1984. 144 p.
21. Horn B.K., Schunck B.G. Determining optical flow // Artificial Intelligence. 1981. Vol. 17. P. 185–204.
22. High Accuracy Optical Flow Estimation Based on a Theory for Wrapping / T. Brox [et al.] // Lecture Notes in Computer Science. 2004. Vol. 3024. P. 25–36.
23. Мачнев А.М., Жук С.Я. Беспойсковый алгоритм определения угла поворота изображений // Вісник Національного технічного університету України. Серія: Радіотехніка. Радіоапаратобудування. 2008. № 37. С. 33–37.
24. Мачнев А.М. Определение угла поворота при наложении изображений с использованием смешанной системы координат // Вісник Національного технічного університету України. Серія: Радіотехніка. Радіоапаратобудування. 2010. № 42. С. 40–45.
25. Ташлинский А.Г. Оценивание параметров пространственных деформаций последовательностей изображений. Ульяновск: Ульяновский государственный технический университет, 2000. 132 с.

Получено: 27.09.2023

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

METHOD OF ITERATIVE COMBINATION OF TV SIGNALS BASED ON LINEARIZATION FOR MACHINE VISION SYSTEMS

Diyazitdinov R.R.

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

E-mail: r.diyazitdinov@psuti.ru

The article describes a method for combining television signals for machine vision systems based on linearization. The relevance of the developed method involves reducing the error when combining signals in the presence of interference arising from changes in illumination, as well as ensuring high processing speed. It is shown that the idea of combination replaces the processing signals of trigonometric functions in the model with a Taylor series, and in adding two variables to the model – additive and multiplicative components. All matching parameters are evaluated by solving a system of linear equations, which is determined by decomposing the matched signal into a Taylor series. An experiment demonstrated the correct combination of television signals using the proposed method, and a comparison was made with the exhaustive search method in terms of measurement error and processing speed. It is noted that the work will be useful for developers of machine vision measurement systems with real time processing.

Keywords: combination, iterative, television signal, linearization, machine vision, optical flow, additive and multiplicative component

DOI: 10.18469/ikt.2023.21.1.11

Diyazitdinov Rinat Radmirovich, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 23, L.Tolstoy Street, Samara, 443010, Russian Federation; Associate Professor of Network and Telecommunication System Department, PhD in Technical Sciences, Associate Professor. Tel. +7-927-708-47-39. E-mail: r.diyazitdinov@psuti.ru

References

1. Androsov V.A. et al. Image superposition in uncertainty conditions. *Zarubegnaya radioelektronika*, 1985, no. 4, pp. 32–41. (In Russ.)
2. Gubanov A.V. et al. Methods of offset estimation by images fragments. *Avtometriya*, 1988, no. 3, pp. 70–73. (In Russ.)
3. Pankova T.L., Reznik, A.L. Error of accurate superposition of digital images. *Avtometriya*, 1991, no. 5, pp. 39–43. (In Russ.)
4. Liu M., Delbruck T. Block-matching optical flow for dynamic vision sensors: Algorithm and FPGA implementation. *IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, 2017, pp. 1–4.
5. Vasin N.N., Kurinskiy V.Yu. Video signal processing for measuring the speed of railway cars on the marshalling hill. *Komp'yuternaya optika*, 2005, no. 27, pp. 185–188. (In Russ.)
6. Artyushenko V.M., Volovach V.I. Estimation of information parameters of the signal on background of additive and multiplicative noise with arbitrary distribution. *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, 2018, vol. 21, no. 4, pp. 58–62. (In Russ.)
7. Diyazitdinov R.R. *Methods for distinguishing and estimating parameters of optical signals: Monograph*. Samara: PGUTI, 2019, 139 p. (In Russ.)
8. Brown L.G. A survey of image registration techniques. *ACM Computing Surveys*, 1992, no. 24(4), pp. 325–376.
9. Barnea D.I., Silverman H.F. A class of algorithms for fast digital registration. *IEEE Transactions on Computers*, 1972, vol. C-21, pp.179–186.
10. Wolberg G., Zokai S. Robust image registration using log-polar transform. *Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing*, 2000, vol. 1, pp. 493–196.
11. Kuglin C.D., Hines D.C. The phase correlation image alignment method. *Proceedings International Conference on Cybernetics and Society*, 1975, pp. 163–165.
12. Alliney S., Morandi C. Digital image registration using Projections. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986, vol. PAMI-8, no. 2, pp. 222–233.
13. De Castro E., Morandi C. Registration of translated and rotated images using finite fourier transforms. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1987, vol. PAMI-9, no. 3. pp. 700–703.
14. Reddy B.S., Chatterji B.N. An FFT-based technique for translation, rotation, and scale-invariant image registration. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1996, vol. 5, no. 8, pp.1266–1270.
15. Xie H. et al. An IDL/ENVI implementation of the FFT-based algorithm for automatic image registration. *Computer and Geosciences*, 2003, no.29, pp. 1045–1055.
16. Forsyth D. Ponce, *Computer Vision: A Modern Approach*. Moscow: Vil'yams, 2004, 928 p. (In Russ.)
17. Pratt W. *Digital image processing*. Transl. From English. Moscow: Mir, 1982, 312 p. (In Russ.)
18. Gonzalez R., Woods R. *Digital image processing*. Transl. From English. Moscow: Tehnosfera, 2005, 1070 p. (In Russ.)
19. Lucas B.D., Kanade T. An iterative image registration technique with an application to stereo vision. *Proceedings Seventh Internatinnal Joint Conference on Artificial Intelligence*, 1981, pp. 674–679.
20. Lucas B.D. *Generalized Image Matching by the Method of Differences*. Pittsburgh: Carnegie-Melion University publisher, 1984, 144 p.

21. Horn B. K., Schunck B. G. Determining optical flow. *Artificial Intelligence*, 1981, vol. 17, pp. 185–204.
22. Brox T. et al. High Accuracy Optical Flow Estimation Based on a Theory for Wrapping. *Lecture Notes in Computer Science*, 2004, vol. 3024, pp. 25–36.
23. Machnev A.M., Guk S.Ya. Non-search algorithm of image angle estimation. *Vestnik Natsional'nogo tehgnicheskogo universiteta Ukraini. Seriya: Radiotekhnika. Radioapparatostroenie*, 2008, no. 37, pp. 33–37. (In Russ.)
24. Machnev A.M. Estimation of rotation angle on image superposition by using mixed coordinate system. *Vestnik Natsional'nogo tehgnicheskogo universiteta Ukraini. Seriya: Radiotekhnika. Radioapparatostroenie*, 2010, no. 42, pp. 42–45. (In Russ.)
25. Tashlinskiy A.G. *The image sequence space deformation parameters estimation*. Ul'yanovsk: Ul'yanovskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet, 2000, 132 p. (In Russ.)

Received 27.09.2023

УПРАВЛЕНИЕ И ПОДГОТОВКА КАДРОВ ДЛЯ ОТРАСЛИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

УДК 004.412

РАЗРАБОТКА МОДУЛЯ СППР ПРИ ФОРМИРОВАНИИ СМЕТЫ ДЛЯ КЛИЕНТОВ ИТ-КОМПАНИИ

Диязитдинова А.Р.¹, Женгурова В.В.^{1,2}

¹Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ

²ПромИнфоКонсалт, Самара, РФ

E-mail: dijazitdinova@mail.ru

В работе рассмотрена актуальность поиска инструментария для объективной оценки трудоемкости и сроков разработки программного обеспечения. Основной целью данного инструментария является, с одной стороны, предоставление ИТ-компаниям возможности объективно оценивать трудоемкость и, следовательно, стоимость будущего программного продукта на ранних стадиях, а, с другой стороны, обеспечение прозрачности обоснования приемлемой цены сделки для заказчика. Особенностью ИТ-отрасли является нематериальный характер создаваемого продукта и, как следствие, определенную сложность представляет задача выбора методов (метрик) оценки трудоемкости и прогнозирования сроков реализации программного продукта, позволяющих без особых временных и финансовых затрат получить реалистичные данные. Приведены результаты проведенного анализа и сравнения наиболее распространенных методов оценки трудоемкости разработки программного продукта (в частности, IFPUG, UCP, СОСОМОП и т.д.), выявлены их преимущества и ограничения. Предлагается обобщенный алгоритм работы системы поддержки принятия решений для сокращения времени и повышения обоснованности расчетов при составлении сметы аналитиком ИТ-компания в рамках подготовки технического задания. Приводится описание отдельных экранных форм проектируемого модуля системы поддержки принятия решений.

Ключевые слова: техническое задание, смета, программный продукт, система поддержки принятия решений, оценка трудоемкости, методики оценки затрат труда, screen flow

Введение

Процесс разработки программного обеспечения (ПО) имеет собственную специфику, которая плохо укладывается в теорию классического управления проектами. Задача проекта заключается в достижении конкретной бизнес-цели, при соблюдении ограничений «железного треугольника»: содержание – стоимость – время [1]. На практике данный принцип означает, что ни одна из трех составляющих не может быть изменена без оказания влияния на две другие. Если же говорить о проекте по созданию ПО, то отдельно следует упомянуть как нематериальный характер создаваемого продукта, так и тот факт, что суще-

ственную долю затрат составляет труд ИТ-специалистов.

Начиная с 60-х гг. XX века (практически с момента появления рынка программного обеспечения), проблема оценки трудозатрат для ИТ-проектов остается одним из самых сложных вопросов в программной инженерии. К настоящему моменту не существует точных и одновременно простых в использовании моделей оценки трудоемкости разработки ПП, которые позволяли бы точно оценивать размер ПП на этапах планирования разработки [2].

Надежные оценки на ранних сроках реализации ИТ-проекта сложно получить из-за от-

сутствия детальной информации о будущем программном продукте (ПП). Тем не менее, на начальных стадиях реализации ИТ-проекта предварительные оценки условий и сроков выполнения заказа весьма важны.

С одной стороны, компании-разработчики заинтересованы в завышении стоимости (тем самым, увеличивая величину дохода), с другой стороны, заказчик заинтересован в снижении стоимости при сохранении полного набора функциональных возможностей будущей информационной системы. Поэтому процесс формирования сметы, от которого напрямую зависит окончательная стоимость ПП, всегда опирается на поиск компромисса между заказчиком и ИТ-исполнителями.

Недооценка стоимости, времени и ресурсов, требуемых для разработки ПП, повлечет за собой недостаточную численность участников ИТ-проекта, излишне сжатые сроки разработки и, как следствие, потерю доверия к разработчикам в случае нарушения календарного графика [3]. Если рассматривать ситуацию переоценки в сторону повышения стоимости проекта, то данная ситуация также имеет свои недостатки. Неоправданно дорогостоящий проект приведет к формированию натянутых отношений с заказчиком, и дальнейшие контакты могут быть осложнены. При задействовании излишнего числа трудовых ресурсов происходит недозагрузка и «расхолаживание» сотрудников, что негативно влияет на психологическую атмосферу в ИТ-компании в целом (сотрудники, задействованные в других проектах, будут считать, что их чрезмерно эксплуатируют). Таким образом, компании, занимающиеся промышленной разработкой ПО, должны владеть методикой и иметь инструментальные средства объективной оценки трудоемкости программных проектов.

Подобный инструментарий должен позволять компании-разработчику выполнить реальную оценку всех своих затрат на основе трудоемкости работ по созданию ПО, обладать прозрачностью для заказчика, который без использования специфических знаний и конфиденциальной информации, сможет обосновать приемлемую цену сделки.

В статье представлены результаты исследований по проектированию модуля системы поддержки принятия решений (СППР) для получения взвешенной оценки трудоемкости разработки ПП и расчета сметы на базе технического задания, учитывающего различные факторы, которые влияют на процесс разработки ПП, и применяемые нормы труда.

Особенности процесса формирования сметы на разработку программного продукта

С точки зрения управления, ИТ-проекты, наряду с традиционными трудностями, свойственными обычным проектам (дедлайны, ограниченность бюджета и нехватка разработчиков, которые могут быть задействованы в проекте, и/или недостаточно высокий уровень профессионализма участников проекта), сталкиваются со специфическими сложностями (технологические аспекты аппаратной и программной платформ, особенности операционной системы, сложность интеграции с уже существующими программными продуктами и пр.). Объяснение этих фактов заключается в природе самого понятия ИТ-проекта: во-первых, постоянно изменяются и адаптируются сами информационные технологии; во-вторых, в отличие от «стандартных» проектов, программный продукт, который должен получиться в результате окончания ИТ-проекта, неосязаем; в-третьих, успешность ИТ-проекта и качество создаваемого ПП напрямую зависят от профессионализма разработчиков. Также управление проектами по созданию ИТ-решений усложняется постоянно изменяющимися требованиями заказчика и условиями бизнеса.

Как следствие, существенную трудность представляет задача выработки четких метрик и инструментов, напрямую связанных с оценками трудоемкости, сроков и затрат ИТ-проекта.

В работе [4] выделены следующие важные характеристики ИТ-проекта, которые необходимо учитывать при составлении сметы:

1. Объем работ по организации проекта. Данный показатель требуется для определения количества организационных единиц, в которых будет осуществляться внедрение / тиражирование ПП. Этот показатель прямо пропорционально влияет на стоимость работ.

2. Объем разрабатываемых функциональных возможностей ПП. От точной оценки этого показателя напрямую зависят все остальные показатели проекта (сроки, цена проекта, количество требуемых человеко-часов, методология разработки ПП и пр.).

3. Методологический объем проекта, описывающий набор нормативно-регламентирующей документации, которую требуется разработать или доработать в ходе реализации проекта.

4. Требуемые интеграционные работы: в этом случае смета ПП может значительно увеличиться.

5. Обеспечение информационной безопасно-

сти в случае, если ПП обрабатывает данные, к которым предъявляются повышенные требования по их защите. Работы по обеспечению информационной безопасности увеличивают стоимость и сложность проекта.

На рисунке 1 представлен обобщенный процесс разработки ПП. Вопрос формирования сметы находится в зоне влияния аналитика, который в одинаковой мере должен хорошо понимать требования технического задания (ТЗ) по конкретному проекту и оценивать возможности продаваемого ПП.

Аналитик при формировании сметы на создание ПП должен учитывать значительное число взаимосвязанных факторов, что делает актуальной задачу поиска инструментария для объективной оценки трудоемкости и сроков разработки ПП. Основной целью данного инструментария является, с одной стороны, предоставление ИТ-компании возможности объективно оценивать трудоемкость и, следовательно, стоимость будущего ПП на ранних стадиях, а, с другой стороны, обеспечение прозрачности обоснования приемлемой цены сделки для клиента.

Задача выбора методов (метрик) оценки трудоемкости и прогнозирования сроков реализации ПП, позволяющих без особых временных и финансовых затрат получить реалистичные данные, представляет определенную сложность. Были выделены следующие «болевые» точки процесса составления сметы на разработку ПП [5].

1) Неточная и изменяющаяся формулировка функциональных требований ТЗ. Как показывает практика, стоимость ПП находится в прямой зависимости от функциональных требований ТЗ, на основании которых можно переходить к формированию проектных решений и рассматривать варианты концепций ПП. Неграмотно проработанные требования и частота изменений требований со стороны заказчика непропорционально увеличивают конечную сумму.

2) Недостаточный учет (а зачастую и просто игнорирование) «второстепенных» факторов: сложность, новизна и критичность задачи; профессионализм и компетенция разработчиков, а также их занятость на других проектах; наличие технологических рисков и прочее.

3) Отсутствие прозрачности взаимосвязи между трудоемкостью и полученной себестоимостью ПП. Для подсчета трудоемкости применяют одну из метрик (СОСОМО II, метод функциональных точек и пр.), а себестоимость продукта рассчитывается либо методом группировки по калькуляционным статьям, либо методом группировки по

экономическим элементам.

В помощь аналитику предлагается разработка и внедрение модуля СППР формирования сметы ПП на основании требований ТЗ.

Методы расчета трудоемкости создания программного продукта

В настоящий момент рыночная стоимость ПП в большей степени представляет собой оценку способности заказчика оплатить расходы на реализацию ИТ-проекта [6]. Характерной особенностью процесса создания ПП является существенная удельная доля трудовых затрат в общих производственных затратах, поэтому основное внимание в публикациях и исследованиях уделено вопросу оценки трудоемкости, от которого напрямую зависит конечная стоимость создаваемого продукта [3; 7; 8]. При расчете стоимости разработки ПП необходимо учитывать следующие факторы:

- размер конечного программного продукта (обычно измеряется числом строк исходного кода (SLOC));
- особенности применяемой методологии разработки ПП;
- возможности и квалификация участников ИТ-команды (personal capability);
- среда разработки ПП;
- требуемое качество продукта (quality assurance), включающее в себя функциональные возможности и нефункциональные требования (к масштабируемости, надежности, адаптируемости и пр.).

Ввиду того, что предварительная оценка стоимости разработки включает в себя множество элементов неопределенности, предприятия используют на практике широкий круг методов – от самых элементарных до весьма изощренных [1].

Анализ многообразных исследований и публикаций показал отсутствие единой общепризнанной классификации методов подсчета трудоемкости. Согласно одной из таких классификаций, многообразие методов и моделей ПП можно разделить на две группы: микрооценки и макрооценки. Методики микрооценок носят субъективно-оценочный характер, так как оценка зависит от руководителя проекта или техлида. Таким образом, если у разработчика нет опыта разработки схожего ПО, то и оценки будут неверными. Методики макрооценок основаны на использовании определенных схем и принципов (а не на применении точных формул), что значительно снижает их объективность. Однако, с учетом большего количества проектов, в которых

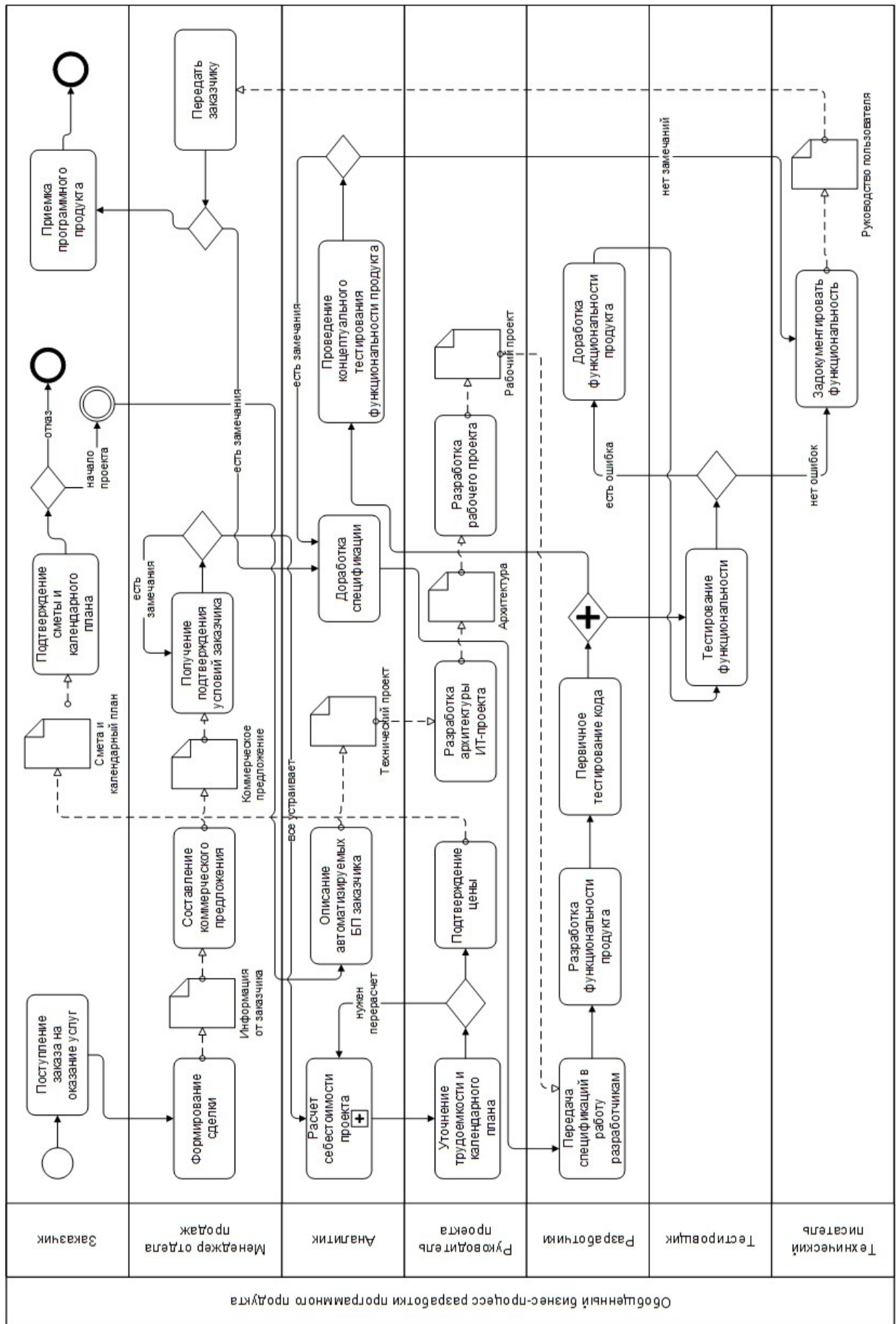


Рисунок 1. Обобщенный процесс создания программного продукта

были проведены макрооценки, они выглядят более надежными.

Другой общепризнанной классификацией является деление на две другие группы: неалгоритмические и алгоритмические. Первая группа подходов основана на интуитивно-логическом анализе проблемы, вторая – на применении определенных математических алгоритмов, использование которых дает возможность достаточно точно рассчитать размер ПП и трудозатраты на его разработку.

К неалгоритмическим относят метод экспертных оценок, метод аналогий, принцип Паркинсона, метод, ориентированный на возможностях бюджета заказчика. В соответствии с алгоритмическими методами, расчет трудоемкости разработки ПП основан на измерении количественных показателей ПП (например, количестве FP) и последующем их делении на количество усилий, затраченных на разработку этих продуктов. К этой группе методов относят, прежде всего, метод функциональных точек (FPA, Function Points Analysis), модель SLIM (Software Life-cycle Model) Л. Патнема, СОСОМОII.

К современным методам отдельные авторы относят генетический метод и метод нейросетевой аппроксимации, байесовские сети, метод имитационного моделирования [3; 9].

В рамках исследования был проведен анализ популярных методов расчета трудоемкости разработки ПП (таблица 1), что облегчает выбор в пользу того или иного способа расчета трудоемкости [6; 9 – 11].

В результате сопоставления пяти распростра-

ненных методик были выделены следующие значимые параметры, которые необходимо учитывать при выборе методики расчета трудоемкости:

- легкость осуществления оценки трудоемкости разработки ПП;
- возможность использования статистики предыдущих проектов, которая не велась в соответствии со специальными требованиями для оценки;
- возможность учета нефункциональных требований;
- гибкость методики, т.е. она не должна быть привязана к каким-то определенным единицам (функциональным блокам) и др.
- учет фактора персонала (его доступности, квалификации и компетенции).

«Наилучшего» подхода в оценке трудоемкости выделить нельзя, что на практике приводит к тому, что разные компании извлекают выгоду из разных подходов в зависимости от контекста. Вероятнее всего, универсальной методики оценки трудоемкости найдено не будет, поэтому в каждом конкретном проекте корректно говорить о применении разнообразных эмпирических подходов, комбинирующих простые в использовании метрики и сложные, но более точные модели.

Модуль системы поддержки принятия решений для расчета сметы на основании требований технического задания

В связи с существующей актуальностью вопроса оценки стоимости ПП в разделе предлагается упрощенный алгоритм разработки модуля СППР для расчета сметы на разработку ПП.

Таблица 1. Сравнение методов расчета трудоемкости

Критерии Методики	Тип модели	Доступность репозитория	Время применения	Учет размера системы	Учет функциональных требований	Учет фактора персонала	Метрика
Методика Госкомтруда	закрытая	–	весь ЖЦ	+	–	–	–
СОСОМО II	закрытая	–	после определения требований	+	+	–	DSI
FPA IFPUG 4.1	открытая	+	весь ЖЦ	+	+	–	FP
Puthnam (SLIM)	открытая	–	после определения требований	+	–	–	SLOC
UCM	закрытая	–	после определения требований	+	+	–	UC

Разработка прототипа СППР для расчета сметы осуществлялась в среде разработки 1С: Предприятие 8. Выбор данного средства разработки обусловлен, прежде всего, тем, что он распространен и относительно прост в освоении. Алгоритм разработки проектируемого модуля СППР упрощенно выглядит следующим образом:

1) Если в проекте участвуют субподрядчики, то необходимо сначала заполнить справочник о партнерах. Данный шаг является специфичным для ИТ-компаний-интеграторов, занимающихся доработкой пакетных продуктов под деятельность заказчика.

2) Ввод справочников: данный шаг является подготовительным, при дальнейших расчетах конкретные значения берутся из справочников. К таким справочникам относят: данные договоров с субподрядчиками; сложность задачи (требования ТЗ); новизна и важность задачи (значения шкал); должности, компетенции и часовые ставки сотрудников, которые могут быть задействованы в разработке ПП.

3) Построение структуры проекта, оценку трудоемкости которого необходимо провести. Фактически на данном шаге заполняются требования ТЗ на разрабатываемый ПП.

4) Распределение исполнителей по задачам (требованиям ТЗ).

5) Анализ статистических данных по выполненным ранее проектам и по исполнителям и предварительный расчет оценки трудоемкости на каждый тип элемента разрабатываемого ПП. За основу расчета взят метод функциональных точек.

6) Автоматический перерасчет оценок элементов, в зависимости от компетенции исполнителя и важности/новизны задачи.

7) Получение конечной оценки стоимости проекта.

На рисунке 2 представлены некоторые разработанные экранные формы.

На форме «Расчет сметы» необходимо заполнить поля:

1) Партнер.

2) Договор (при выборе клиента, в списке выбора договоров будут доступны для выбора только договора, заключенные с этим партнером).

3) Сложность задачи (выбор из списка «Низкая», «Средняя», «Высокая»).

4) Трудоемкость задачи (выбор из списка «Низкая», «Средняя», «Высокая»).

5) Новизна задачи (выбор из списка «Новая», «Редко встречающаяся», «Типовая»).

6) Важность задачи (выбор из списка «Некритичная», «Средняя», «Критичная»).

7) Количество сотрудников (после того как вводится количество, автоматически появляются

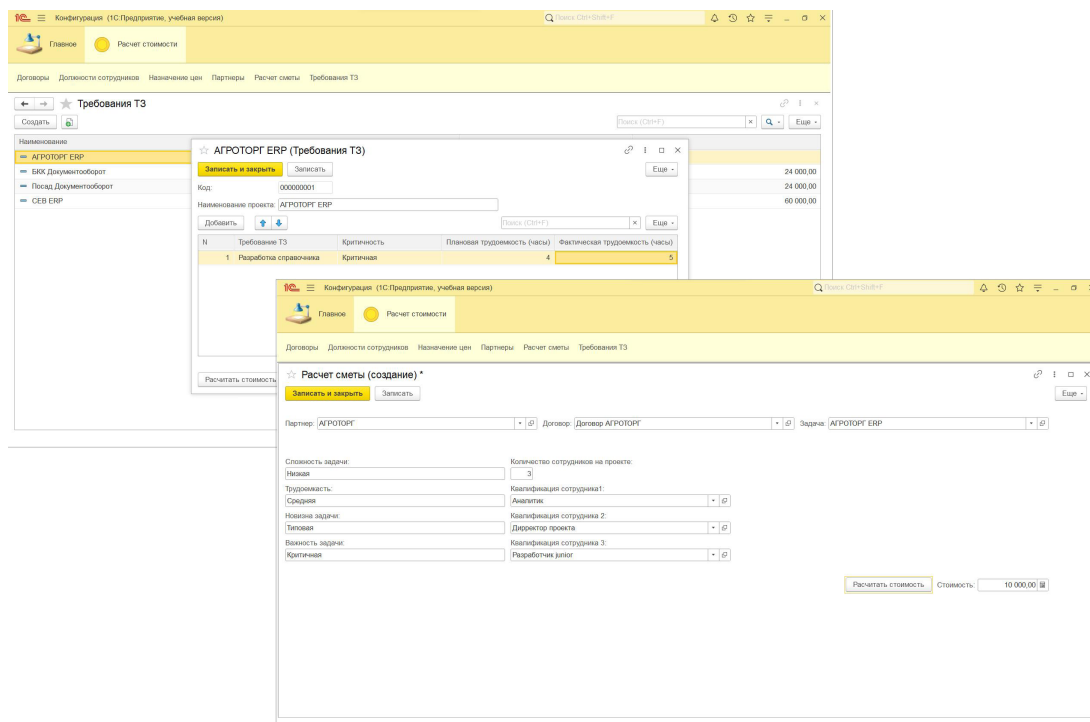


Рисунок 2. Screen flow модуля СППР

поля для ввода квалификаций и занятости сотрудников на проекте, изначально эти поля скрыты).

В реквизите «Квалификация сотрудников» необходимо будет указать должность сотрудника (для выбора будут доступны только те должности, по которым внесены цены по договору в регистре «Цены»).

В реквизите «Занятость на проекте» необходимо указать степень занятости сотрудника на проекте, по которому рассчитывается стоимость задачи (выбор из списка «Низкая», «Средняя», «Высокая», «Очень высокая»).

По кнопке «Рассчитать» рассчитывается примерная стоимость задачи, на основании данных, введенных на форме и правилам, внесенным в базу.

Применение предлагаемого инструментария должно способствовать повышению объективности при формировании сметы на создание ПП.

Заключение

Актуальность исследования обусловлена необходимостью получения корректной оценки сложности и, следовательно, трудоемкости и стоимости разрабатываемого ПП на ранних этапах работы над проектом.

При разработке ИТ-проектов основными ресурсами выступают: бюджет проекта, время на создание ПП, необходимое и доступное количество специалистов с соответствующей компетенцией и квалификацией.

Оценить объем необходимых трудозатрат на выполнение требований ТЗ без достоверной информации о его сложности достаточно тяжело. Но сделать это на начальном этапе проектирования ПП руководителю проекта необходимо. Неверная или неточная оценка трудоемкости ИТ-проекта приведет к снижению эффективности реализации ПП, поэтому разработаны различные методики и методы для прогнозирования затрат и оценки сложности ИТ-проектов. В работе проведен анализ наиболее распространенных методик расчета трудоемкости ПП. Все эти методики довольно трудоемкие, поэтому предлагается внедрить в деятельность аналитика модуль СППР для расчета сметы будущего ПП.

Внедрение модуля СППР должно позволять аналитику при анализе требований ТЗ проводить корректную оценку затрат на основе трудоемкости. Для заказчика должна быть предусмотрена возможность обосновать приемлемую цену сделки без использования специфических знаний и конфиденциальной информации.

Литература

1. Архипенков С.Я. Лекции по управлению программными проектами. М.: Самиздат, 2009. 128 с.
2. Мицель А.А., Шелковников К.А., Истомин Н.А. Методы оценки трудоемкости проектов // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2006. № 6. С. 91–95.
3. Ваганова Е.В., Земцов А.А., Миньков С.Л. Оценка стоимости разработки программного продукта: обзор // Проблемы учета и финансов. 2016. № 1(21). С. 58–62.
4. Диязитдинова А.Р., Лиманова Н.И. Использование нечетко-множественного подхода при управлении заданиями ИТ-проекта // Программные продукты и системы. 2019. Т. 32, № 1. С. 5–11.
5. Женгурова В.В., Диязитдинова А.Р. Особенности формирования сметы при составлении ТЗ клиентам ИТ-компании // Актуальные проблемы информатики, радиотехники и связи: материалы XXX Российской научно-технической конференции. Самара: ПГУТИ, 2023. С. 200–201.
6. Анализ методик оценки трудоемкости разработки программного обеспечения / А.В. Будник [и др.] // Веснік сувязі. 2020. № 4 (162). С. 36–41.
7. Макконнелл С. Сколько стоит программный проект. М.: Русская Реакция, СПб.: Питер, 2007. 297 с.
8. Вендров А.М. Практикум по проектированию программного обеспечения экономических информационных систем: учеб. пособие; 2-е изд. М.: Финансы и статистика, 2006. 191 с.
9. Алиев Х.Р., Андржеевский С.О., Борисов М.Б. Модели оценки стоимости информационных систем в методологиях разработки программного обеспечения // Прикладная информатика. 2009. № 5(23). С. 33–43.
10. Тютюнников Н.Н. Оценка размера создаваемого программного средства использованием функциональных точек // Перспективы развития информационных технологий. 2014. № 18. С. 51–57.
11. Нащеева А.А., Гутгарц Р.Д. Оценка трудоемкости проекта по созданию программного продукта // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2011. № 11(58). С. 249–252.

Получено 23.05.2023

Диязитдинова Альфия Радмировна, к.т.н., доцент, доцент кафедры прикладной информатики (ПИ) Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ). 443010, Российская федерация, г. Самара, ул. Л. Толстого, 23. Тел. +7 917 942-57-45. E-mail: dijazitdinova@mail.ru

Женгурова Валерия Витальевна, ведущий консультант по информационным системам ГК «ПромИнфоКонсалт». 443011, Российская Федерация, г. Самара, ул. 22 Партсъезда, д. 207; магистрант кафедры ПИ ПГУТИ. 443010, Российская Федерация, г. Самара, ул. Л. Толстого, 23. Тел. +7 927 600-75-25. E-mail: lerazhengurova@yandex.ru

DEVELOPMENT OF A DSS MODULE WHEN PREPARING ASSESSMENTS FOR IT COMPANY CLIENTS

Diyazitdinova A.R.¹, Zhengurova V.V.^{1,2}

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

²PromInfoConsalt, Samara, Russian Federation

E-mail: dijazitdinova@mail.ru

The article considers the relevance of the search for toolkit for objective software development complexity and timing assessment. The key purpose of this toolkit is to provide an IT company with the opportunity to objectively assess the labor intensity, the cost of a future software product at an early stage, on the one hand, and to ensure transparency in justifying an acceptable transaction price for the customer, on the other hand. A special feature of the IT industry is the intangible nature of the created product and, as a result, the challenge of choosing methods (metrics) for labor intensity assessment and predicting the timing of the software product implementation, which allows obtaining realistic data without serious time and financial costs, poses a certain difficulty. The results of the analysis and comparison of the most common methods of software development complexity assessment (in particular, IFPUG, UCP, COCOMOII, etc.), including identification of advantages and limitations, are presented. A generalized algorithm for the decision support system operation is proposed to reduce time and increase the validity of calculations when drawing up estimates by an IT company analyst as a part of the preparation of technical specifications. A description of individual screen forms of the decision support system designed module is provided.

Keywords: *technical specification, estimate, software product, decision support system, labor intensity assessment, methods for estimating labor costs, screen flow*

DOI: 10.18469/ikt.2023.21.1.12

Diyazitdinova Alfiya Radmirovna, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 23, L. Tolstoy Street, Samara, 443010, Russian Federation; Associated Professor of Applied Informatics Department, PhD in Technical Science, Associated Professor. Tel. +7 917 942-57-45. E-mail: dijazitdinova@mail.ru

Zhengurova Valeria Vitaliyevna, PromInfoConsalt, 207, 22 Partsezda Street, Samara, 443011, Russian Federation; Leading Information Systems Consultant; Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 23, L. Tolstoy Street, Samara, 443010, Russian Federation; Master's Degree Student of Applied Informatics Department. Tel. +7 927 600-75-25. E-mail: lerazhengurova@yandex.ru

References

1. Arkhipenkov S.Ya. *Lectures on software project management*. Moscow: Samizdat, 2009. 128 p. (In Russ.)
2. Mitsel A.A., Shelkovnikov K.A., Istomin N.A. Methods for assessing the complexity of projects. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki*, 2006, no. 6, pp. 91–95. (In Russ.)

3. Vaganova E.V., Zemtsov A.A., Minkov S.L. Software development cost estimation: a survey. *Problemy ucheta i finansov*, 2016, no. 1 (21), pp. 58–62. (In Russ.)
4. Diyazitdinova A.R., Limanova N.I. Fuzzy set approach for it project task management. *Programmnyye produkty i sistemy*, 2019, vol. 32, no. 1, pp. 5–11. (In Russ.)
5. Zhengurova V.V., Diyazitdinova A.R. Specific of cost sheet preparation for IT-company technical requirements clients. *Aktual'nyye problemy informatiki, radiotekhniki i svyazi: materialy XXX Rossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*. Samara: PSUTI, 2023, 303 p. (In Russ.)
6. Budnik AV. et al. Analysis of methods for assessing the complexity of software development. *Vestnik svyazi*, 2020, no. 4(162), pp. 36–41. (In Russ.)
7. Mc Connell S. *How much does a software project cost*. Moscow: Russkaya Reaktsiya, Saint Pe-tersburg: Piter, 2007, 297 p. (In Russ.)
8. Vendrov A.M. *Workshop on the design of software for economic information systems: Textbook*. 2th Ed. Moscow: Finansy i statistika, 2006, 191 p. (In Russ.)
9. Aliev Kh.R., Andrzheevsky S.O., Borisov M.B. Using information systems cost estimation models in software engineering methodologies. *Prikladnaya informatika*, 2009, no. 5(23), pp. 33–43. (In Russ.)
10. Tyutyunnikov N.N. Estimation of the size of the created software tool using functional points. *Perspektivy razvitiya iformatsionnykh tekhnologiy*, 2014, no. 18, pp. 51–57. (In Russ.)
11. Nashcheeva A.A., Gutgarts R.D. Estimation of labour-intensiveness of a project on software product creation. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2011, no. 11 (58), pp. 249–252. (In Russ.)

Received 23.05.2023