

---

# **ПРОБЛЕМЫ ИНФОКОММУНИКАЦИЙ**

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ**

Издается с сентября 2015 года

**Учредитель**  
учреждение образования «Белорусская государственная академия связи»

Выходит два раза в год

---

Минск, Белорусская государственная академия связи, 2024 г., № 2 (20)

## **РЕДКОЛЛЕГИЯ:**

Главный редактор А.О. Зеневич  
Заместитель главного редактора Л.Л. Гладков  
Ответственный секретарь В.В. Дубровский

## **Члены редакционной коллегии:**

М.А. Вилькоцкий, В.А. Вишняков, И.Р. Гулаков, Г.Е. Кобринский, В.И. Курмашёв,  
И.А. Михайлова-Станюта, В.К. Конопелько, Л.М. Лыньков, Т.В. Борботько, Т.М. Мансуров,  
Л.И. Гречихин, Н.Ш. Блаунштейн, Н.Г. Назири, Е.Б. Ташманов

## *АДРЕС РЕДАКЦИИ:*

220076, Минск, ул. Ф. Скорины, 8/2, к. 403

355-96-08

*pic@bsac.by*

## СОДЕРЖАНИЕ

### КИБЕРФИЗИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

<b>Мансуров Т.М., Алиев Ч.П.</b> Устройство для измерения линейного ускорения и скорости движущихся объектов .....	5
<b>Коваленко Т.Г., Жданович С.В.</b> Волоконно-оптический датчик на основе микроизгибов оптического волокна .....	10

### ЦИФРОВАЯ СВЯЗЬ

<b>Дубровский В.В., Дулькевич А.И.</b> Алгоритм каскадного кодирования информационного потока для защищенных систем передачи цифровых данных .....	17
<b>Мельянец Г.И., Прашкович Н.Г., Кочергина О.В., Боженков В.В., Домбровский Н.В.</b> Разнесенный радиоприем для технологии Massive MIMO .....	25

### ТЕХНОЛОГИИ СВЯЗИ

<b>Гулаков И.Р., Зеневич Я.А., Матковская Т.А.</b> Воздействие высоких температур на оптическое волокно .....	31
<b>Половения С.И., Соловьев А.Н., Корнеева А.Ф.</b> Исследование атмосферного канала передачи данных непрямой видимости .....	36
<b>Ходасевич О.Р., Рыбычина О.П.</b> Анализ методов юстировки оптических волокон .....	44
<b>Ивашко В.М., Романова Е.С., Геливер О.Г.</b> Перспективы внедрения технологий на основе сетей связи стандарта IMT-2020 в отраслях экономики .....	50

### ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

<b>Самодумкин С.А.</b> Имплементация пространственно-соотнесенных данных в семантически совместимых интеллектуальных системах .....	57
<b>Вишняков В.А., Ивей С.</b> Структура сети Интернета вещей и алгоритмы для диагностики неврологического заболевания .....	63
<b>Яблочников С.Л., Яблочникова И.О.</b> К вопросу обеспечения заданного уровня точности управления информационными процессами .....	71

### КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

<b>Железняк В.К., Раханов К.Я., Лавров С.В., Филиппович А.Г., Барановский М.М.</b> Системная защита информации от утечки по техническим каналам .....	79
<b>Султанова Ш.А., Пайызов Э.Ш., Расуллу Т.К., Джамалзаде Н.И., Намазов Д.С., Исмаилов Р.П.</b> Моделирование топологии FSON с использованием алгоритма Дейкстры .....	83

---

Научный журнал «Проблемы инфокоммуникаций» включен в Перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований по техническим наукам (информатика, вычислительная техника и управление; радиотехника, связь) и физико-математическим наукам (радиофизика, электроника) в соответствии с решением Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь от 09.12.2016 № 18/7.

*Индекс для индивидуальной подписки 00319*  
*Индекс для ведомственной подписки 003192*

---

Редактор М.Д. Дука  
Компьютерный дизайн и верстка Т.В. Сайко

Подписано в печать 11.12.2024. Формат 60×84/8. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».  
Печать цифровая. Усл. печ. л. 9,77. Уч.-изд. л. 7,06. Тираж 100 экз. Заказ 3082.

---

Отпечатано в типографии ООО «Полиграфт». Лиц. № 02330/466 от 21.04.2014 г., г. Минск, ул. Кнорина, 50.

© Учреждение образования «Белорусская государственная академия связи», 2024

---

# **PROBLEMY INFOKOMMUNIKACIJ**

**SCIENTIFIC JOURNAL**

Published since September, 2015

**Founder**

**Educational Establishment «Belarusian State Academy of Communications»**

Published twice a year

---

Minsk, Belarusian State Academy of Communications, 2024, № 2 (20)

**Editor-In-Chief A.A. Zianeovich**

*ADDRESS OF EDITORIAL OFFICE:*

*220076, Minsk, F. Scorina Str., 8/2, Room 403*

*355-96-08*

*pic@bsac.by*

## CONTENTS

### CYBERPHYSICAL SYSTEMS

- Mansurov T.M., Aliev Ch.P.** Device for measuring linear acceleration and velocity of moving objects .....5  
**Kovalenko T.G., Zhdanovich S.V.** Fiber optic sensor based on micro bends of optical fiber.....10

### DIGITAL COMMUNICATIONS

- Dubrouski V.V., Dulkevich H.I.** Cascade information encoding algorithm for secured digital data communication systems .....17  
**Melyanets G.I., Prashkovich N.G., Kochergina O.V., Bozhenkov V.V., Dombrovsky N.V.** Radio diversity for Massive MIMO technology .....25

### COMMUNICATION TECHNOLOGIES

- Gulakov I.R., Zianeovich Y.A., Matkovskaia T.A.** The effect of high temperatures on optical fiber.....31  
**Palavenia S., Salauyou A., Karneyeva A.** Research of the atmospheric data channel indirect visibility .....36  
**Khodasevitch O.R., Ryabychina O.P.** Analysis of optical fiber alignment methods .....44  
**Ivashko V.M., Romanova E.S., Geliver O.G.** Prospects for the introduction of technologies based on communication networks of the IMT-2020 standard in economic sectors .....50

### INTELLIGENT SYSTEMS

- Samodumkin S.** Implementation of spatially referenced data in semantically compatible intelligent systems .....57  
**Vishniakou U.A., Iway Xia** The structure of the Internet of Things network and algorithms for the diagnosis of ne neurologisk disease .....63  
**Yablochnikov S.L., Yablochnikova I.O.** On the issue of ensuring a given level of accuracy in information process management .....71

### SHORT MESSAGE

- Zheleznyak V.K., Rakhanov K.Y., Lavrov S.V., Filippovich A.G., Baranovsky M.M.** Systemic protection of information from leakage via technical channels .....79  
**Sultanova Sh.A., Paiyzov E.Sh., Rasullu T.K., Djamalzade N.I., Namazov D.S., Ismailov R.P.** FSON topology modeling using Dijkstra algorithm..... 83

**КИБЕРФИЗИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ**

DOI: 10.61726/4491.2024.31.15.001

УДК 621.391.63: 621.395(075); 681.326.7

**УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЛИНЕЙНОГО УСКОРЕНИЯ И СКОРОСТИ ДВИЖУЩИХСЯ ОБЪЕКТОВ**Т.М. МАНСУРОВ<sup>1</sup>, Ч.П. АЛИЕВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Азербайджанский Технический Университет,  
пр-т. Г. Джавида 25, Баку, AZ1173, Азербайджан  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7948-4682>

<sup>2</sup>Азербайджанский Технический Университет,  
пр-т. Г. Джавида 25, Баку, AZ1173, Азербайджан  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7042-323X>

Поступила в редакцию 7 октября 2024

На основе анализа известных работ сделан вывод о том, что эти устройства не позволяют измерить линейные ускорения, изменяющиеся в относительно малых пределах, они в основном выполняют процесс измерения ускорений объекта измерения, созданных в результате горизонтальных вибраций и ударов. На основе анализа и определения недостатков предложено устройство для измерения линейного ускорения и скорости движущихся объектов, позволяющее повысить чувствительность и возможность работать в двух режимах пьезоэлектрического вибратора, обеспечить расширение функциональных возможностей и измерение скорости путем интегрирования интегратором сигнала. Кроме того, разработана математическая модель, которая позволяет определить необходимые узлы при построении схемы управления устройства для измерения линейного ускорения и скорости движущихся объектов в автоматическом режиме.

*Ключевые слова:* объект измерения, вибрация, линейное ускорение, скорость, пьезоэлемент, деформация, движущийся объект.

**Введение.** В настоящее время известны устройства для измерения линейных ускорений и скоростей и для определения внешних влияний при отклонении из своих позиций движущихся объектов. Но из-за наличия элементов, создающих электромагнитные поля, конструкция таких устройств в определенной мере усложняется. С другой стороны, из-за малой чувствительности известные устройства не позволяют измерение линейных ускорений, изменяющихся в относительно малых пределах, они в основном выполняют процесс измерения ускорений объекта измерения, созданных в результате горизонтальных вибраций и ударов.

На основе анализа и определения недостатков существующих устройств предложено устройство для измерения линейного ускорения и скорости движущихся объектов, которое содержит поджатый к основанию корпуса (1) винтовой пружиной (2) пьезоэлектрический чувствительный элемент с механической деформацией на сжатие-растяжение и закрепленную на нем инерционную массу (3), при этом вектор поляризации пьезоэлектрического чувствительного элемента ориентирован вдоль оси чувствительности акселерометра [1–3].

Данное устройство выполнено в виде плоской металлической пластины (4) с выступом (5), сваренной с двух сторон широкими гранями пьезоэлектрической пластины (6), (7), образующие многослойный биморфный вибратор. Он размещен в крепежной колодке (8), подпружинен винтовой пружиной и обеспечивает регулировку перемещения в вертикальном направлении, причем в выступной части плоской металлической пластины, в виде сферической инерционной массы, в свободном конце вибратора, в его средней части на широкой грани пьезоэлектрического биморфного вибратора, выполненного в виде металлического куба (9), с двух сторон жестко закреплен.

Механические колебания изгиба совпадают с направлением вектора линейного ускорения объекта измерений (10). Электроды пьезоэлектрического биморфного вибратора состоят из двух отдельных изоляционными полосами (11) секций электродов, где электроды (12), (13) секции возбуждения подключены к источнику переменного тока (14), а электроды (15), (16) другой секции пьезоэлектрического чувствительного элемента подключены к входу дифференциального операционного усилителя (17). Первый выход дифференциального операционного усилителя соединен с входом первого индикатора (18), а второй выход через интегратор (19) соединен с входом второго индикатора (20). Электрические контакты (21), (22) пьезоэлектрического чувствительного элемента и электроды (23) секции возбуждения соответственно подключены к их электродам. Все элементы акселерометра собраны внутри одной неподвижной крышки (24).

На рис. 1 и 2 даны схемы разработанного устройства для измерения линейного ускорения и скорости движущихся объектов и схема его управления [2].

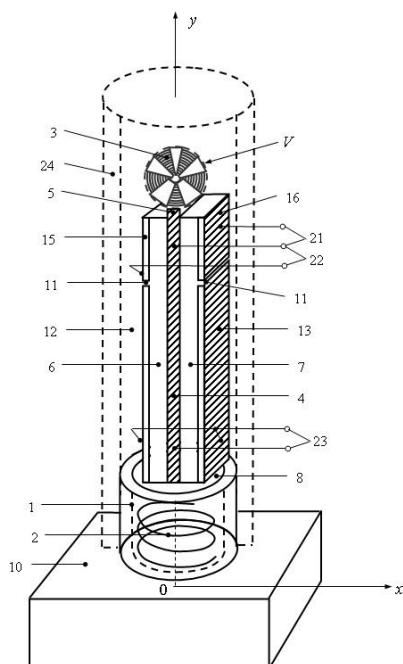


Рис. 1. Схема устройства для измерения линейного ускорения и скорости движущихся объектов в статике

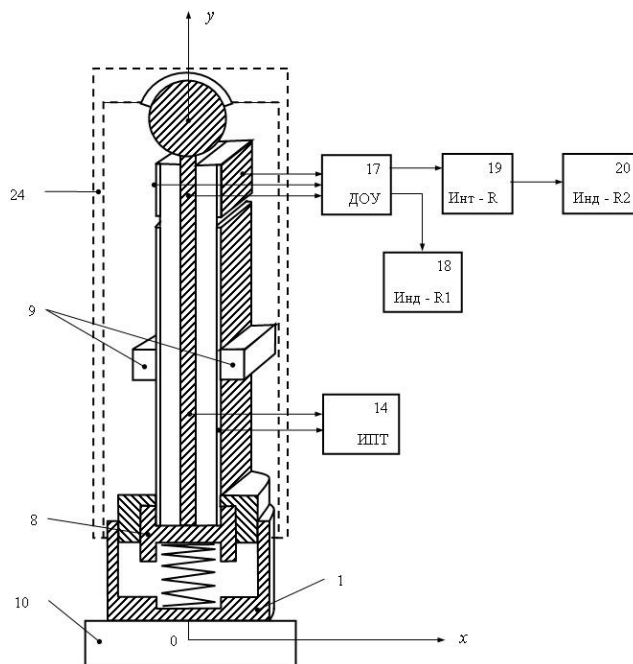


Рис. 2. Конструктивные элементы устройства для измерения линейного ускорения и скорости движущихся объектов со схемой управления

**Принцип работы устройства для измерения линейного ускорения и скорости движущихся объектов.** Путем подачи напряжения через контакты электрической связи (23) от источника переменного тока (14) к секциям возбуждения (12), (13) данного устройства возбуждается на одной из собственных частот. При подаче положительной полярности на пьезоэлектрическую пластину (12), а на другую пьезоэлектрическую пластину (13) – отрицательной полярности, пластина (12) подвергается деформации растяжения и удлиняется, а другая пластина (13) – деформации сжатия и укорачивается, что приводит к изгибу в правую сторону пьезоэлектрического вибрационного акселерометра [2, 3].

Устройство для измерения линейного ускорения и скорости движущихся объектов вместе с инерционной массой создает колебания изгиба с переменным знаком и в направлении оси по длине измеряемого объекта (10) происходит движение с линейной скоростью  $V_x$ . Во время движения измеряемого объекта (10) с линейной скоростью на него действуют инерционные силы, приводящие к деформациям секций пьезоэлектрического чувствительного элемента и одновременно переданные к секциям (15), (16). В том случае в секции (12) происходит деформация растяжения (удлинение), а секция (15) подвергается механической деформации (сжатию) (рис. 1, 2). В силу совпадения направления оси чувствительности пьезоэлектрического чувствительного элемента с направлением оси вектора поляризации происходит уменьшение его размеров в этом направлении. Уменьшение размеров секции (15) приводит к уменьшению плотности электрических зарядов на поверхности электродов. Механическое растяжение по длине секции (16) приводит к увеличению плотности

электрических зарядов и в отличие от деформации сжатия создается разность потенциалов с отрицательным знаком. За счет изменения полярности подаваемого напряжения к секциям (12), (13) происходит согнутая деформация, что приводит к изгибу пьезоэлектрического вибрационного акселерометра в обратном направлении. В результате этого на секции (15), (16) пьезоэлектрического чувствительного элемента действует вибрационная инерционная сила и это действие происходит в единицах инерции силы тяжести, что приводит к созданию составляющего напряжения в секциях (15), (16) при соответствии частоты пьезоэлектрического биморфного вибратора к частоте возбуждения. Напряжение с электродов секции (15), (16) пьезоэлектрического чувствительного элемента подается на дифференциальный вход операционного усилителя.

Ускорение ( $W_x$ ), созданное в результате движения с повышением скорости вдоль измеряемого объекта (10) в направлении оси абсцисс "оx" за счет инерции инерционной массы (3), отстает от движения корпуса устройства (1) и пьезоэлектрический биморфный вибратор подвергается дополнительной деформации (сгибанию), что передается пьезоэлектрическим чувствительным секциям, в результате чего одна секция (15) подвергается деформации сжатия, а другая секция (16) – деформации расширения.

Под воздействием разности напряжений  $\Delta U = U_1 - U_2$  на выходе дифференциального усилителя (17) создается напряжение прямо пропорциональное измеряемым ускорениям и сигнал, поступающий с выхода интегратора (19) с составляющей линейной скорости  $V$ . Напряжение с выхода интегратора (19) поступает на вход индикатора (20) (рис. 3) и его показание определяет значение скорости передвижения измеряемого объекта (10).

Режим работы акселерометра, представленного на рис. 3, аналогичен режиму работы акселерометра, представленного на рис. 1, 2. Единственное отличие заключается в том, что свободный конец пьезоэлектрического биморфного вибратора через эластичную сферическую железную массу (3) шарнирно установлен на неподвижной крышке (24), возбуждаются механические согнутые колебания и его чувствительная ось совпадает направлением линейного ускорения движущего объекта.

**Математическая модель функционирования устройства для измерения линейного ускорения и скорости движущихся объектов.** Известно, что влияние на секции чувствительного пьезоэлемента объекта, движущегося с линейной скоростью, происходит в единицах инерционной силы тяжести и влияет на создание составляющих напряжения, получаемого из электродов пьезоэлемента [2–6].

В разработанном устройстве в качестве рабочего органа предложено применять пьезоэлектрический элемент, выполненный в виде двухслойных плоских пластин по каждой координатной оси  $X$ ,  $Y$  и  $Z$ , склеенных или сваренных между собой широкими гранями, имеющими секцию возбуждения и секцию чувствительного элемента, в зависимости от изменения направления движения объекта измерения. Применение пьезоэлектрического элемента в качестве рабочего (преобразовательного) органа связано с его преимуществами, перечисленными выше.

При движении объекта измерения по одной из координатной оси создается влияние на секции чувствительности пьезоэлектрического элемента, измеряемое в единицах инерционной силы тяжести и в результате происходит создание составляющих напряжения, получаемого из электродов пьезоэлектрического элемента.

Момент инерции пьезоэлектрического элемента связан с геометрической формой инерционной массы и определяется следующим образом [2, 7–10]:

$$i = l_2 \cdot l_3^3 / 12, (\text{м}^4) \quad (1)$$

где  $l_2$  – ширина пьезоэлектрического элемента (м);  $l_3$  – толщина пьезоэлектрического элемента (м).

Жесткость пьезоэлектрического элемента акселерометра определяется следующей формулой:

$$C = l_1 / 3 \cdot E_o \cdot i, (\text{Н/м}) \quad (2)$$

где  $l_1$  – длина пьезоэлектрического элемента (м);  $E_o$  – модуль Юнга (модуль упругости) ( $\text{Н/м}^2$ );  $i$  – момент инерции пьезоэлектрического элемента ( $\text{м}^4$ ).

Согласно выражению (2) в известном устройстве пьезоэлектрический элемент имеет относительно высокое значение жесткости [2, 3] и поэтому для снятия сигнала с напряжением 0,5 мВ с электродов чувствительного пьезоэлектрического элемента значение линейной инерционной силы должно быть в 5–6 раз выше значения данной силы, действующей на чувствительный

пьезоэлектрический элемент. Поскольку значение линейной инерционной силы находится на низкой чувствительной зоне, то он позволяет измерить относительно меньшие значения данной силы.

Дифференцируя векторы скорости свободного конца пьезоэлектрического элемента по временному вектору можно определить ускорение свободного конца пьезоэлектрического элемента по следующей формуле:

$$\vec{i} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d^2r}{dt^2}, \quad (3)$$

где  $\vec{v}$  – скорость свободного конца пьезоэлектрического элемента (м/с);  $t$  – время (с);  $r$  – траектория движения.

Если учесть траектории движения объекта измерений по одной из координатной оси, то в какой-то момент времени –  $t_0$  вектор траектории движения  $\vec{r}(t) = \vec{r}_0$  и зависимость вектора ускорения свободного конца пьезоэлектрического элемента от времени  $\vec{i} = \varphi(t)$ .

Тогда интегрируя формулы (3) на интервале времени от  $t_0$  до  $t$  получим следующие зависимости для определения  $\vec{v}$  – скорости свободного конца пьезоэлектрического элемента и  $\vec{r}(t)$  – вектора траектории движения:

$$\vec{v}(t) = \vec{v}_0 + \int_{t_0}^t \vec{i} dt, \quad (4)$$

$$\vec{r}(t) = \vec{r}_0 + (t - t_0)\vec{v}_0 + \int_{t_0}^t \int_{t_0}^t \vec{i} dt^2. \quad (5)$$

Если вектор времени  $\vec{i}$  не меняется, тогда данное движение объекта измерения считается равноускоренным и преобразуя формулы (4) и (5) получим выражения для определения скорости свободного конца пьезоэлектрического элемента и вектора траектории движения соответственно:

$$\vec{v}(t) = \vec{v}_0 + (t - t_0) \cdot \vec{i}, \quad (6)$$

$$\vec{r}(t) = \vec{r}_0 + (t - t_0) \cdot \vec{v}_0 + \frac{(t - t_0)^2}{2} \cdot \vec{i}. \quad (7)$$

Таким образом, в зависимости от назначения устройства разработанная математическая модель позволяет определить необходимые узлы при построении схемы управления устройства для измерения динамических параметров движущихся объектов в автоматическом режиме.

**Заключение.** Таким образом, разработанный вибрационный акселерометр отличается следующими важными новыми особенностями.

Предложенное устройство обеспечено плоской металлической пластиной с выступом и крепление инерционной массы на близком расстоянии от секции пьезоэлектрического чувствительного элемента на плоской металлической пластине с выступом увеличивает влияние инерционной силы, что позволяет повысить чувствительности пьезоэлектрического вибрационного акселерометра.

Сварка пьезоэлектрических пластин с двух сторон на широкой грани плоской металлической пластины, тем самым организация многослойного пьезоэлектрического биморфного вибратора и размещение на укрепляющей колодке, разделение электродов вибратора в виде выделенных друг от друга двумя полосами изоляции и подключение электродов секции возбуждения пьезоэлектрического биморфного вибратора к источникам переменного напряжения приводит к изгибной деформацию пьезоэлектрического биморфного вибратора, а подключение электродов секции пьезоэлектрического чувствительного элемента к входам дифференциального операционного усилителя за счет усиления амплитуды получаемого напряжения позволяет повысить чувствительности вибратора 3–4 раза.

Крепление металлической инерционной массы в виде эластичной сферической массы на свободном конце вибратора в выступной части плоской металлической пластины, а в его средней части жесткое закрепление с двух сторон инерционной массы в виде металлического куба на широкой грани пьезоэлектрического биморфного вибратора, увеличение создаваемой массы во время движения и наличие возможности работы в двух режимах пьезоэлектрического биморфного вибратора обеспечивает расширение функциональных возможностей акселерометра и измерение скорости путем интегрирования интегратором сигнала.



**DEVICE FOR MEASURING LINEAR ACCELERATION AND VELOCITY OF MOVING OBJECTS**

T.M. MANSUROV, Ch.P. ALIEV

**Abstract**

Based on the analysis of known works, it was concluded that these devices do not allow measuring linear accelerations that vary within relatively small limits; they mainly perform the process of measuring the accelerations of the measurement object created as a result of horizontal vibrations and impacts. Based on the analysis and definition of shortcomings, a device for measuring the linear acceleration and speed of moving objects is proposed, which allows increasing the sensitivity and the ability to work in two modes of a piezoelectric vibrator, providing for an expansion of functionality and measuring speed by integrating the signal with an integrator. In addition, a mathematical model has been developed that allows determining the necessary nodes when constructing a control circuit for a device for measuring the linear acceleration and speed of moving objects in automatic mode.

**Список литературы**

1. Пьезоэлектрический акселерометр : патент Российской Федерации № 2400760 / А. А. Кирпичев; <http://www.findpatent.ru/patent/240/2400760.html>© FindPatent.ru – патентный поиск, 2012–2015.
2. Мансуров, Т. М. Пьезоэлектрический вибрационный акселерометр / Т. М. Мансуров, Ч. П. Алиев // Агентство интеллектуальной собственности Азербайджанской Республики. Патент Азербайджанской Республики № I 2020 0027. – Баку, 2020, 15.07.2020.
3. Мансуров, Т. М. Трёхкоординатный акселерометр для измерения ускорения и скорости объекта измерений в автоматическом режиме / Т. М. Мансуров, Ч. П. Алиев // Евразийское Патентное Ведомство Евразийской Патентной Организации. Евразийский Патент № 036355. – М, 2020 от 29.10.2020. – 8 с.
4. Янчич, В. В. Пьезоэлектрические датчики вибрационного и ударного ускорения : учеб. Пособие / В. В. Янчич. – Ростов н/Д : Издательство ЮФУ, 2008. – 77 с.
5. Янчич, В. В. Пьезоэлектрические виброизмерительные преобразователи (акселерометры) / В. В. Янчич. – Ростов н/Д : Издательство ЮФУ, 2010. – 304 с.
6. Шарапов, В. М. Пьезоэлектрические датчики / В. М. Шарапов, М. П. Мусиенко, Е. В. Шарапова. – М. : Техносфера, 2006. – 632 с.
7. Godfrey, A. Direct measurement of human movement by accelerometry/ A. Godfrey [et al.] // Med Eng Phys. – 2008. – № 30 (10). – P. 1364–1386.
8. Mannini, A. Machine learning methods for classifying human physical activity from On-Body Accelerometers / A. Mannini, A.M. Sabatini // Sensors. – 2010. – № 10. – P. 1154–1175.
9. Yang, C. C. Development of a wearable motion detector for telemonitoring and real-time identification of physical activity / C. C. Yang, Y. L. Hsu, // Telemed. J. E. Health. – 2009. – № 15 (1). – P. 62–72.
10. Mathie, M. J. Accelerometry: providing an integrated, practical method for long-term, ambulatory monitoring of human movement / M. J. Mathie [et al.] // Physiol. Meas. – 2004. – № 25. – P. 1–20.

DOI: 10.61726/1388.2024.67.39.001

УДК 621.391.64:681.7.068

## ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК НА ОСНОВЕ МИКРОИЗГИБОВ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА

Т.Г. КОВАЛЕНКО<sup>1</sup>, С.В. ЖДАНОВИЧ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Учреждение образования «Белорусская государственная академия связи»,  
ул. Ф. Скорины, 8/2, Минск, 220076, Беларусь  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3399-7495>

<sup>2</sup>Учреждение образования «Белорусская государственная академия связи»,  
ул. Ф. Скорины, 8/2, Минск, 220076, Беларусь  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8131-7434>

Поступила в редакцию 15 октября 2024

Представлены результаты исследований микроизгибов оптического волокна, на основе которых возможно создание волоконно-оптического датчика. Для создания волоконно-оптического датчика массы предложено использовать несколько микроизгибов, расположенных последовательно по длине оптического волокна. Предложена экспериментальная установка, с помощью которой определено влияние параметров формирования микроизгибов и их взаиморасположения на оптическом волокне на характеристики волоконно-оптических датчиков при различных длинах волн оптического излучения (650 нм, 1310 нм, 1490 нм, 1550 нм, 1625 нм). Полученные результаты позволяют определить параметры формирования микроизгибов и их взаиморасположения для достижения максимальной чувствительности волоконно-оптического датчика массы. Исследования проводились с использованием оптического волокна типа G.655. Установлено, что для создания волоконно-оптического датчика определения массы с помощью микроизгибов оптического волокна целесообразно использовать микроизгибы, формируемые металлической проволокой диаметром 200 мкм, длину волны 1625 нм, при увеличении количества микроизгибов чувствительность датчика возрастает.

*Ключевые слова:* изгиб оптического волокна, оптическое волокно, микроизгиб, оптическое излучение, ослабление, волоконно-оптический датчик, датчик массы.

**Введение.** Основное преимущество волоконно-оптических датчиков обусловлено, прежде всего, возможностями их интеграции со средствами передачи информации и объединения их в волоконно-оптические системы сбора и обработки данных. Кроме того, волоконно-оптические датчики могут применяться во взрывоопасной среде ввиду абсолютной искро- и взрывобезопасности, имеют малые габариты, простую конструкцию и, соответственно, высокую надежность, химически инертны, изготавливаются из диэлектрических материалов, что обеспечивает отсутствие путей прохождения через них электрического тока, имеют высокую стойкость к повышенным температурам, вибрациям и другим воздействиям окружающей среды, позволяют производить бесконтактные и дистанционные измерения, потребляют малое количество энергии, сигналы, поступающие от волоконно-оптических датчиков, позволяют производить простое мультиплексирование. Волоконно-оптические датчики позволяют обеспечивать измерения, в которых электронные устройства либо вообще нельзя применять, либо такое использование сопровождается значительными трудностями и затратами (например, измерение температуры в высоковольтных электрических аппаратах, в генераторах переменного тока, в трансформаторах; измерение тока и напряжения в высоковольтных линиях электропередачи; измерение температуры небольших поверхностей, имеющих низкую теплопроводность и переменную отражающую способность; в труднодоступных местах) [1]. Волоконно-оптические датчики характеризуются обеспечением чрезвычайно высокого уровня

безопасности при эксплуатации. Отсутствие источника электрической мощности в зоне измерения и замена ее световой энергией с уровнем не выше 1 мВт гарантирует совершенно безопасную работу волоконно-оптических датчиков в потенциально пожаро- и взрывоопасных условиях. Важнейшим достоинством волоконно-оптических датчиков является невосприимчивость их к помехам, создаваемым высокочастотными электромагнитными полями и токами замыкания через землю. Благодаря этому достоинству волоконно-оптических датчиков возможно получение большой экономии в области управления технологическими процессами, поскольку появляется возможность прокладки силовых электрических кабелей и измерительных трасс в единых каналах. В высоковольтных сетях электропередачи такая невосприимчивость к помехам дает возможность прокладывать волоконно-оптические линии передачи информации и сигнализации параллельно силовым линиям. Применение волоконно-оптических датчиков устраняет опасность поражения электрическим током, поэтому они предпочтительнее электрических датчиков в системах медицинского назначения. Волоконно-оптические датчики позволяют организовывать распределенную систему измерения со значительными расстояниями (до 20 км) между отдельными устройствами с передачей данных по единому волоконно-оптическому кабелю. Уникальным свойством волоконно-оптического принципа преобразования является его универсальность, на его основе представляется возможным реализовать волоконно-оптические датчики [2–5].

Для контроля состояния различных объектов и окружающей среды применяются волоконно-оптические датчики, позволяющие измерять физические параметры, такие как вибрация, давление, деформация, температура и др. [6–13]. Возможность реализации датчиков на основе макроизгибов оптического волокна представлена в работах [14–17].

Волоконно-оптические датчики на основе макроизгибов также просты в реализации, под макроизгибом оптического волокна понимается резкое изменение кривизны волокна, представляющее собой локальное осевое смещение порядка нескольких микрометров. Макроизгиб отличается от макроизгиба тем, что радиус макроизгиба меньше диаметра оптического волокна с акрилатным покрытием. Однако волоконно-оптические датчики на основе макроизгибов недостаточно изучены. Целью настоящей статьи является определение параметров формирования макроизгибов оптического волокна для создания волоконно-оптических датчиков измерения массы. Принцип работы волоконно-оптических датчиков на основе макроизгиба основан на изменении условий распространения светового излучения в волоконно-оптическом волокне в зоне измерений (формирования макроизгиба), обусловленных изменением геометрических или физических параметров оптического волокна под действием измеряемой физической величины, что приводит к изменению интенсивности оптического излучения, проходящего через оптическое волокно.

**Экспериментальная установка и методика исследования.** Для проведения исследования выбрано одномодовое оптическое волокно с параметрами, соответствующими рекомендации МСЭ-Т G.655, которое имеет большее значение чувствительности при формировании макроизгиба по сравнению с другими типами одномодового оптического волокна, имеющими широкое распространение в волоконно-оптических системах передачи данных [18].

На рис. 1 представлены экспериментальная установка для проведения исследований, включающая источники оптического излучения с длинами волн: 650, 1310, 1490, 1550 и 1625 нм, измеритель мощности оптического излучения, оптическое волокно ОВ, текстолитовые пластины Пластина 1 и Пластина 2, формователи макроизгибов, в качестве которых используется металлическая проволока разного диаметра, нагрузка массой  $m$ . В качестве источников оптического излучения и измерителя оптической мощности при проведении исследований используется оптический тестер ОТ 3-1, калиброванный в аккредитованной калибровочной лаборатории. Источники излучения оптического тестера позволяют направлять в оптическое волокно излучение в исследуемом диапазоне длин волн: 1310, 1490, 1550 и 1625 нм, что соответствует «окнам прозрачности» одномодового оптического волокна [19]. Мощность оптического излучения, поступающего в ОВ, для всех длин волн имела значение 1 мВт.

Оптическое волокно подключается к источнику оптического излучения и к измерителю мощности оптического излучения. Длина оптического волокна ОВ в процессе проведения экспериментов не превышала 5 м, поэтому потерями мощности оптического излучения в исследуемых оптических волокнах можно пренебречь.

На оптическом волокне формируются макроизгибы  $m_1$  –  $m_n$ , для создания которых металлические проволоки располагаются перпендикулярно оптическому волокну. При проведении исследований использовались проволоки диаметром 200 мкм [18]. При диаметре проволоки больше

200 мкм происходил излом оптического волокна, а при диаметре проволоки меньше 100 мкм – ослабление излучения на микроизгибе практически отсутствовало.

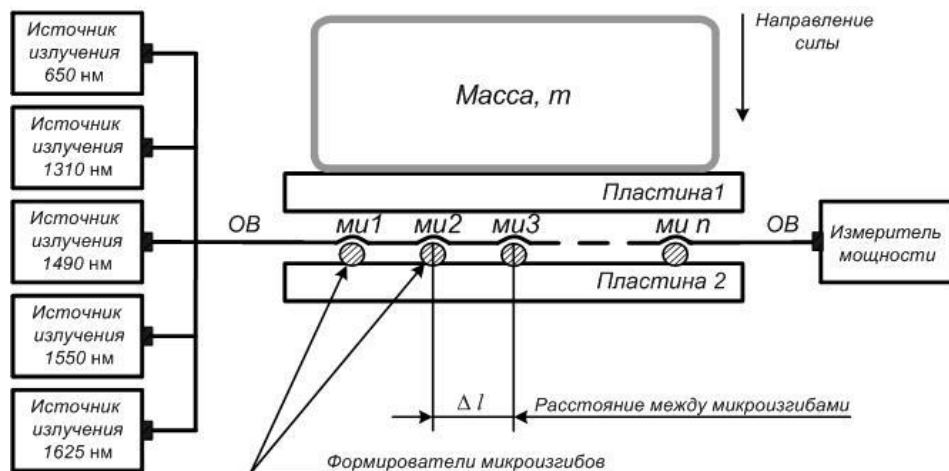


Рис. 1. Экспериментальная установка для проведения исследований:  
ОВ – оптическое волокно; ми 1 – ми  $n$  – микроизгибы оптического волокна

Формирование микроизгиба осуществляется при сдавливании проволоки и оптического волокна текстолитовыми пластинами Пластина 1 и Пластина 2 посредством усилия, создаваемого грузом массой  $m$ , который располагается на Пластина 1, а Пластина 2 располагается на горизонтальной твердой поверхности. Текстолитовая пластина Пластина 1 и груз имеют массу, которая достаточна для формирования микроизгибов на оптическом волокне ОВ. При увеличении массы  $m$  величина ослабления мощности оптического излучения на микроизгибах увеличивается. В ходе экспериментальных исследований проводилось определение ослабления мощности оптического излучения, вносимого микроизгибами:

$$D_{\Pi} = 10 \lg \left( \frac{P_{\text{в}}}{P} \right), \quad (1)$$

где  $P_{\text{в}}$  – мощность источника излучения на входе в ОВ;  $P$  – мощность оптического излучения, поступающего на измеритель мощности, на выходе из ОВ.

Чувствительность датчика на микроизгибах оптического волокна, формируемого под воздействием некоторой массы, характеризуется величиной  $\alpha$ , определяемой по формуле:

$$\alpha = \frac{\Delta D_{\Pi}}{\Delta m} = \frac{D_{1\Pi} - D_{0\Pi}}{m_1 - m_0}, \quad (2)$$

где  $\Delta m$  – изменение действующей массы,  $\Delta D_{\Pi}$  – изменение ослабления мощности оптического излучения,  $D_{1\Pi}$  – ослабление мощности оптического излучения в оптоволокне при воздействии на него усилия, создаваемого массой  $m_1$ ,  $D_{0\Pi}$  – ослабление мощности оптического излучения в оптоволокне при воздействии на него усилия, создаваемого массой  $m_0$ . Стабильность источников оптического излучения и свойства одномодового оптического волокна, а также параметров измерителя мощности оптического излучения (ГОСТ ИЕС 60050 731-2017) достигалась соблюдением условий измерения в соответствии с требованиями ГОСТ ISO/IEC 17025-2019. Исследования проводились при температуре окружающей среды 20–25 °С, влажности до 70 %, атмосферном давлении 975–1025 гПа.

**Результаты эксперимента и их обсуждение.** В работе [18] нами были выполнены исследования, в процессе проведения которых установлено, что увеличение диаметра формирующей микроизгиб проволоки приводит к росту ослабления мощности оптического излучения на микроизгибе оптоволокна при постоянном значении действующей на него массы, а также определено, что наибольшее значение чувствительности к массе воздействия наблюдается для оптоволокна G.655, причем максимальная чувствительность достигается при длине волны оптического излучения 1625 нм. В процессе данного исследования для создания волоконно-оптического датчика использовались несколько микроизгибов, расположенных на разных расстояниях друг от друга. Для формирования микроизгибов применялась

формирующая микроизгиб проволока диаметром 200 мкм. На рис. 2 представлены фотографии трех сформированных микроизгибов на оптическом волокне G.655, когда в оптическое волокно направлено излучение с длиной волны 650 нм.

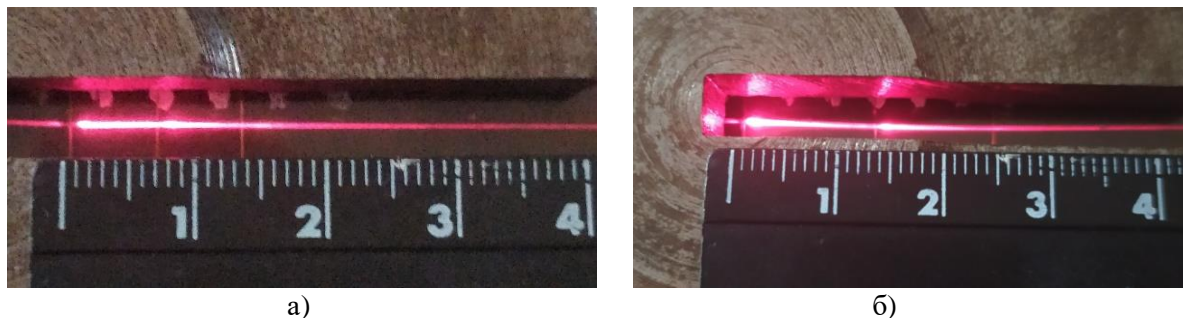


Рис. 2 Выходящее оптическое излучение при наличии трех микроизгибов оптического волокна (длина волны 650 нм): а – расстоянии между микроизгибами 0,7 см; б – расстоянии между микроизгибами 1,4 см

При проведении этого эксперимента в качестве Пластины 1 использовалось стекло, а в грузе, формирующем микроизгибы, имелся разрез, позволяющий проводить наблюдение.

На рис. 3 представлены фотографии выходящего оптического излучения (длина волны 650 нм) при наличии одного и двух микроизгибов оптического волокна при расстоянии между микроизгибами 0,35 см и 0,7 см. Ослабление мощности проходящего через микроизгиб оптического излучения вызывается тем, что часть излучения выходит из сердцевины оптического волокна оболочку оптического волокна и рассеивается в окружающем пространстве. На приведенных фотографиях видно рассеивание оптического излучения в области микроизгибов при использовании оптического излучения в видимом диапазоне (длина волны 650 нм), на всех фотографиях оптическое излучение распространяется слева направо.

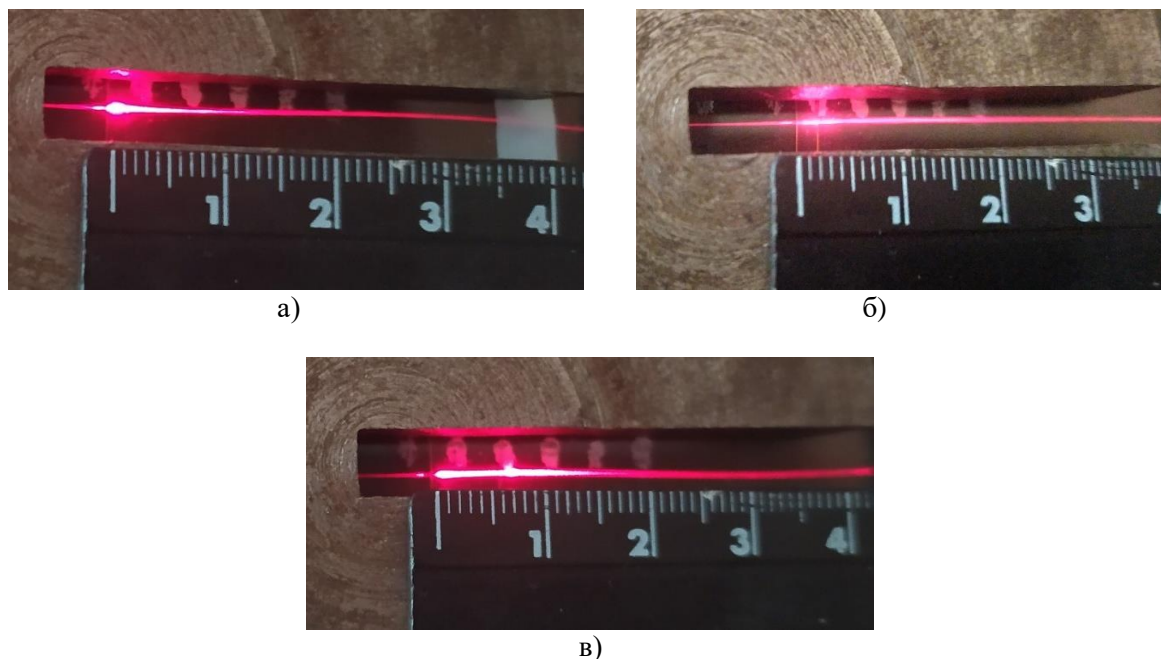


Рис. 3 Выходящее оптическое излучение при наличии микроизгибов оптического волокна (на длине волны 650 нм): а – 1 микроизгиб; б – два микроизгиба при расстоянии между микроизгибами 0,35 см; в – два микроизгиба при расстоянии между микроизгибами 0,7 см

В процессе исследования были определены зависимости ослабления мощности оптического излучения для длин волн 1310, 1490, 1550 и 1625 нм для волоконно-оптических датчиков, создаваемых формированием двух, трех и пяти микроизгибов оптоволокна G.655. Типичные

зависимости ослабления мощности оптического излучения  $D_{п}$  от массы  $m$  груза, формирующего микроизгибы, приведены на рис. 4 для трех и пяти микроизгибов, расположенных с шагом 0,7 см на длине волны 1625 нм. На рис. 5 представлены зависимости ослабления мощности оптического излучения  $D_{п}$  от количества микроизгибов, формируемых с шагом 0,7 см при различных  $m$  на длине волны 1625 нм.

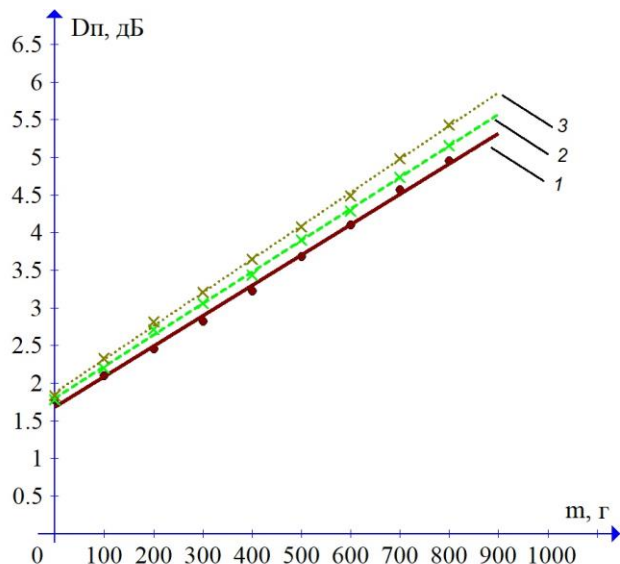


Рис. 4. Типичные зависимости ослабления мощности оптического излучения от массы для длины волны 1625 нм: 1 – один микроизгиб, шаг 0,7 см; 2 – три микроизгиба, шаг 0,7 см; 3 – пять микроизгибов, шаг 0,7 см

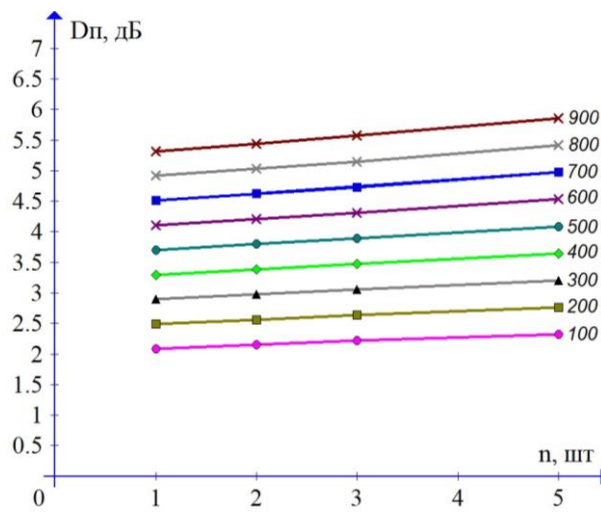


Рис. 5. Зависимости ослабления мощности оптического излучения от количества микроизгибов, формируемых с шагом 0,7 см для различных масс (100–900 г) на длине волны 1625 нм

На рис. 6 представлены зависимости ослабления мощности оптического излучения  $D_{п}$  от массы  $m$  груза, формирующего три микроизгиба, расположенных с шагом 0,7 см при использовании оптического излучения с длиной волны 1550 нм и при использовании оптического излучения с длиной волны 1625 нм.

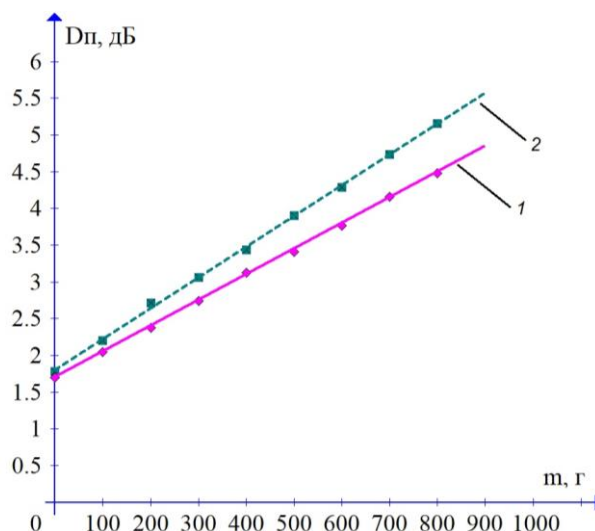


Рис. 6. Зависимости ослабления мощности оптического излучения от массы при трех микроизгибах, формируемых с шагом 0,7 см: 1 – длина волны 1550 нм; 2 – длина волны 1625 нм

Значения чувствительности датчика на микроизгибах оптического волокна G.655 для исследуемых длин волны 1550 и 1625 нм и разного количества микроизгибов оптического волокна представлены в таблице.

Таблица

**Характеристики датчика на микроизгибах оптического волокна G.655**

Микроизгибы		Длина волны, нм	$D_{оп}$ , дБ	$D_{пл}$ , дБ	$\alpha$ , дБ/г
количество, шт	шаг, мм				
1	0	1625	2,11	4,95	0,0041
3	0,7	1550	2,05	4,47	0,0035
3	0,7	1625	2,20	5,16	0,0042
5	0,7	1625	2,33	5,43	0,0043

**Заключение.** Таким образом, как показывают результаты эксперимента, на основе микроизгиба оптического волокна можно создать датчик массы, при этом в качестве чувствительного элемента можно использовать несколько микроизгибов, формируемых на оптическом волокне G.655. Для создания волоконно-оптического датчика определения массы с помощью микроизгибов оптического волокна целесообразно использовать микроизгибы, формируемые металлической проволокой диаметром 200 мкм, длину волны оптического излучения 1625 нм. Проведенные исследования показывают, что при увеличении количества микроизгибов чувствительность датчика на микроизгибах оптического волокна возрастает, но при этом возрастает величина ослабления оптического излучения и после прохождения оптического излучения через датчик на измеритель мощности поступает оптическое излучение меньшей мощности. Так как нижний диапазон измерения мощности ограничен, то увеличение количества микроизгибов для повышения чувствительности датчика требует увеличения мощности источника оптического излучения.

**FIBER OPTIC SENSOR BASED ON MICRO BENDS OF OPTICAL FIBER**

T.G. KOVALENKO, S.V. ZHDANOVICH

**Abstract**

The results of studies of micro-bends of optical fiber, on the basis of which it is possible to create fiber-optic sensors, are presented. To create fiber-optic mass sensors, it is proposed to use several micro bends arranged sequentially along the length of the optical fiber. An experimental setup is proposed with the help of which the influence of the parameters of the formation of micro bends and their mutual location on an optical fiber on the characteristics of fiber-optic sensors at various wavelengths of optical radiation (650 nm, 1310 nm, 1490 nm, 1550 nm, 1625 nm) is determined. The results obtained make it possible to determine the parameters of the formation of micro-bends and their mutual location in order to obtain maximum sensitivity of fiber-optic mass sensors. The research was carried out using optical fiber type G.655. It has been established that to create fiber-optic sensors for determining mass using micro bends of optical fiber, it is advisable to use micro bends formed by a metal wire with a diameter of 200 microns and a wavelength of 1625 nm. With an increase in the number of micro bends, the sensitivity of the sensor increases.

**Список литературы**

1. Бадеева, Е. А. Теоретические основы проектирования амплитудных волоконно-оптических датчиков давления с открытым оптическим каналом: Монография / Е. А. Бадеева [и др.]. – М. : МГУЛ, 2004. – 246 с.
2. Мурашкина, Т. И. Амплитудно-фазовые датчики перемещений / Т. И. Мурашкина // Приборы и системы управления, 1989. – № 8. – С. 29–31.
3. Акопов, С. Г. Волоконно-оптическая техника: история, достижения, перспективы. / С. Г. Акопов [и др.] : под редакцией Дмитриева С. А., Слепова Н. Н. – М : Издательство «Connect», 2000. – 376 с.
4. Patterson, R. I. A Fiber-Optic Current Sensor for Aerospace Applications / R. I. Patterson [et al.] // IEEE AES System Magazine, December, 1990. – Vol. 5. – P. 10–14.
5. Yamagata, Y. Development of Optical Current Transformer and Application to Fault Location Systems for Substations / Y. Yamagata [et al.] // IEEE Trans, of Power Del., 1993. – Vol. 8. – № 3. – P. 1–155.

6. Гулаков, И. Р. Компоненты волоконно-оптических линий связи: учеб. пособие / И. Р. Гулаков, А. О. Зеневич, Т. М. Мансуров. – Минск : Белорусская государственная академия связи, 2020. – 336 с.
7. Гулаков, И. Р. Волоконно-оптические датчики физических величин: монография. / И. Р. Гулаков, А. О. Зеневич. – Минск : Белорусская государственная академия связи, 2022. – 367 с.
8. Udd, E. Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists / E. Udd, B. William, Jr. Spillman, 2011. – Wiley, – 624 p.
9. Качура, С. М. Перспективные оптоволоконные датчики и их применение (обзор) / С. М. Качура, В. И. Постнов // Композиционные материалы. – Тр. ВИАМ. – 2019. – № 5 (77). – С. 52–61.
10. Дмитриев, С. А. Волоконно-оптическая техника: современное состояние и новые перспективы / С. А. Дмитриев, Н. Н. Слепов. – М : Техносфера, 2010. – 607 с.
11. Connolly, C. Structural monitoring with fibre optics / C Connolly // Europhotonics. – 2009. – № 2–3. – P. 16 – 18.
12. Вялышев, А. И. Волоконно-оптические датчики для контроля параметров состояния объектов и окружающей среды в задачах мониторинга / А. И. Вялышев [и др.] // Природообустройство, 2014. – № 3. – С. 32–379.
13. Гончаренко, И. А. Датчики контроля состояния инженерных и строительных конструкций на основе оптических волноводных структур / И. А. Гончаренко, В. Н. Рябцев // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь, 2013. – № 2 (18). – С. 118–132.
14. Зеневич, А. О. Применение волоконно-оптических датчиков на основе макроизгиба в системах мониторинга безопасности объектов / А. О. Зеневич [и др.] // Веснік сувязі. – 2020. – № 5. – С. 50–53.
15. Зеневич, А. О. Исследование характеристик мультидатчика на основе оптического волокна / А. О. Зеневич [и др.] // Докл. БГУИР. – 2021. – Т. 19, – № 1. – С. 70–78.
16. Василевский, Г. В. Использование макроизгиба оптоволоконна в качестве основы для создания датчика массы / Г. В. Василевский [и др.] // Изв. вузов. Приборостроение. – 2020. – Т. 63, № 10. – С. 930–937.
17. Зеневич, А. О. Датчик обнаружения проникновения на основе макроизгиба одномодового оптического волокна / А. О. Зеневич [и др.] // Веснік сувязі. – 2020. – № 1. – С. 56–59.
18. Коваленко, Т. Г. Исследование параметров микроизгибов одномодового оптического волокна для датчиков массы / Т. Г. Коваленко [и др.]. // Изв. вузов. Приборостроение. – 2024. – Т. 67, № 1. – С. 96–102.
19. Листвин, А. В. Оптические волокна для линий связи / А. В. Листвин, В. Н. Листвин, Д. В. Швырков. – М. : ЛЕСАРпт, 2003. – 288 с.



**ЦИФРОВАЯ СВЯЗЬ**

DOI: 10.61726/7562.2024.70.39.001

УДК 621.391

**АЛГОРИТМ КАСКАДНОГО КОДИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННОГО ПОТОКА ДЛЯ ЗАЩИЩЕННЫХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ЦИФРОВЫХ ДАННЫХ**В.В. ДУБРОВСКИЙ<sup>1</sup>, А.И. ДУЛЬКЕВИЧ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Учреждение образования «Белорусская государственная академия связи»,  
ул. Ф.Скорины, 8/2, Минск, 220076, Беларусь  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4102-5744>

<sup>2</sup>Учреждение образования «Белорусская государственная академия связи»,  
ул. Ф.Скорины, 8/2, Минск, 220076, Беларусь  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5225-1077>

Поступила в редакцию 19 ноября 2024

В статье рассмотрен цифровой алгоритм каскадного кодирования информационного сигнала системой нелинейных порождающих функций, определяемых на конечном множестве значений, что обеспечивает повышение спектральной эффективности сигнально-кодовой конструкции для систем подвижной цифровой связи 5-го поколения и наземных систем телекоммуникаций. Реализовано численное программирование алгоритма. Приведены результаты численного моделирования. Определены основные пути практической реализации.

*Ключевые слова:* каскадное кодирование информации, вычислительный раунд, цифровой сигнал, нелинейная динамика, кодирование информации, самосинхронизация, рекуррентная последовательность, случайно-подобный процесс, защита информации, спектральная эффективность.

**Введение и постановка задачи.** Алгоритмы кодирования информации на основе рекуррентно вычисляемых последовательностей [1–4] в системах с разрядностью счета  $M$  бит обеспечивают гибкость управления их характеристиками, однако проблема значительного количества неопределенностей в системе кодирующих функций при  $Q/M > 1/2$  существенно усложняет механизмы достижения предельной спектральной эффективности. Здесь и ниже  $Q$  – длина информационного блока в битах.

В работе предлагается использовать каскадное кодирование информационных блоков, генерируемых нелинейными динамическими системами (НДС), формируя тем самым специальные синтетические блоки сигнально-кодовой конструкции (СКК), гарантирующие однозначность декодирования потока на стороне приема и обработки сигнала. Существенной особенностью подхода является наличие специального раундового субалгоритма в корректировке фазовой траектории процесса на выходе НДС, что существенно стохастизирует кодированный сигнал, увеличивая информационную безопасность системы и спектральную эффективность кодера-декодера (кодека).

Сущность подхода, в отличие от ранее опубликованных результатов [5, 6], состоит в том, что в предлагаемом алгоритме значения с коллизиями не исключаются и не заменяются на определенные кодовые слова, а предпринимаются попытки раундового кодирования информационного потока до тех пор, пока система нелинейных порождающих функций (НПФ) не будет давать однозначно декодируемое значение. Иначе говоря, формируется каскад промежуточных кодовых состояний, подвергаемых адаптивному анализу, исходя декодируемости конечного значения сигнального блока.

**1. Алгоритм каскадного кодирования информационного потока.** Логика каскадного кодирования цифрового потока заключается в следующем:

1) если на базовом такте неоднозначности декодирования отсутствуют, кодируем информационное значение вычисленным, поскольку оно уникально и, следовательно, декодируется корректно;

2) при наличии неоднозначностей начинаем рекуррентное раундовое вычисление до тех пор, пока не получим уникальное значение, которое не встречается на предыдущих раундах в качестве уникального.

Алгоритм каскадного кодирования информации можно определить следующими выражениями:

$$h_{k,i} = \mathbf{F}(h_{k-1}, h_{k-2}) = \mathbf{P} \times \begin{bmatrix} h_{k-1} \\ h_{k-2} \\ 1 \end{bmatrix}, \text{ если } h_{k,i} \neq h_{k,j}, i \neq j; x_k = i. \quad (1)$$

где  $k \in \mathbb{N}$  – порядковый номер рабочего такта кодера, имеющий физический смысл времени;  $i = \overline{0, N-1}$ ,  $N = 2^Q$ ;  $N$  – объем сигнально-кодовой конструкции, численно равный количеству уравнений в системе нелинейных порождающих функций (НПФ)  $\mathbf{F}(a_i x + b_i y + q_i)$ .

Матрица порождающих коэффициентов  $\mathbf{P}$  определяется выражением:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} a_0 & b_0 & q_0 \\ & \dots & \\ a_{N-1} & b_{N-1} & q_{N-1} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Если условие (1) не выполняется, то начинает работу каскадный кодер, работа которого определяется вычислением циклической функции  $\Theta_r$  над двумя состояниями системы:

$$h_{k,i} \equiv h_{k,i,r} = \Theta_r \left[ \mathbf{F}(h_{k,i \bmod N}, h_{k-1}) \right], \text{ если } \begin{cases} h_{k,i,r} \neq h_{k,j,r}, i \neq j; x_k = i; \\ h_{k,i,r} \exists! h_{k,i,0}, h_{k,i,r-1}. \end{cases} \quad (3)$$

Здесь  $r = i \bmod N$  – номер вычислительного раунда;  $h_{k,i \bmod N} = (i \bmod N)$ - значение, взятое на  $k$ -м такте работы кодера. Оператор «mod» означает деление по модулю числа справа. Знак  $\exists!$  указывает на то, что значение слева от него не должно быть уникальным на множестве справа от него. Номера раундов считаются от нуля до  $N - 1$ , далее индексы циклически повторяются.

Поясним логику выражения (3) и работу алгоритма кодирования на его основе. После того как базовый кодер определил невыполнимость условия (1) каскадный кодер в качестве второго аргумента системы НПФ определяет значение  $h_{k-1}$ , а в качестве первого – одно из значений системы (1) с индексом  $(i \bmod N)$ . Затем вычисляется система НПФ и, в зависимости от результата, он либо формирует отсчет СКК, либо кодер продолжает раундовое вычисление. Условие останова работы каскадного кодера следующее. Одновременно должны выполняться два условия (см. правую часть уравнения (3)):

1) значение  $h_{k,i,r}$  на раунде  $r$  для информационного значения  $x_k = i$  является единственным на множестве;

2) значение  $h_{k,i,r}$  на раунде  $r$  не встречается во множестве вычисленных значений на раундах от 0 до  $r - 1$  в качестве уникального.

Выполнение указанных условий обеспечивает возможность однозначного декодирования информационного потока на стороне приема и обработки СКК.

**2. Алгоритм каскадного декодирования информационного потока.** При выполнении условий (1) и (3) алгоритм декодера цифрового потока в сравнении с известными [3, 4] существенно упрощается.

$$x_k^* = \begin{cases} i, \text{ если } f_i(s_{k-1}, s_{k-2}) = s_k \cap s_k \exists \mathbf{F}; \\ i_r, \text{ если } \Theta_r \left[ \mathbf{F}(s_{k,i \bmod N}, s_{k-1}) \right] = s_{k,i} \cap s_{k,i,r} \exists \Theta_r. \end{cases} \quad (4)$$

где  $x_k^*$  – оценочное значение переданного состояния информационного потока;  $S_k$  – значение сигнала на  $k$ -м такте; запись  $S_k \exists \mathbf{F}$  означает, что значение декодируемого сигнального отсчета  $S_k$  является уникальным на множестве значений  $\mathbf{F}$ , а вычисленное на  $r$ -м раунде значение  $S_{k,i,r}$  уникально на множестве  $\Theta_r$ .

Особенность алгоритмов кодирования (1), (3) и декодирования (4) состоит в существенном снижении требований к коэффициентам системы (2), что расширяет класс алгоритмов кодирования информации методами нелинейной динамики применительно к перспективным системам стационарной и подвижной цифровой связи. Техническая скорость передачи информации определяется соотношением:

$$R = \frac{Q}{M}. \quad (5)$$

Подчеркнем, что в рассматриваемом случае длина информационного блока  $Q$  может быть произвольной и равняться  $M$ . При этом информационные потери будут отсутствовать.

**3. Программная реализация каскадного кодирования-декодирования информации.** Алгоритмы (1), (3), (4) реализованы авторами на языке системного программирования Nim, программный код которого транслируется в код на языке Си, а затем, с помощью любого из доступных компиляторов, например, GNU Compiler Collection (GCC) преобразуется в чрезвычайно быстрый исполняемый двоичный файл. Указанный подход позволяет за приемлемое время всесторонне исследовать НДС на предмет потенциальных аномалий, а также изучить особенности работы кодека на длительных интервалах наблюдения, рассматривая сгенерированный случайно-подобный процесс как эргодический. Кроме того, синтезированный низкоуровневый программный код на языке Си адаптируем для применения в вычислительных устройствах, функционирующих в режиме реального времени. Текст программы представлен табл. 1.

Таблица 1

**Алгоритм каскадного кодирования, реализованный на языке программирования Nim**

```

1  func theCoder*(SIG: var MTX, Info: MTX, COEFF: MTX, funType: int) =
2  let
3      M = SIG[0][0].width
4      N = high(COEFF) + 1
5      L = size(SIG)[1]
6  var
7      tmp, i: int
8      x, y: FWN
9      RR: seq[int]
10     RRround: intMTX
11     REF: seq[int] = toSeq(-2^(M - 1) .. 2^(M - 1) - 1)
12     val: int
13     uniqueVals, inds: seq[int]
14     for k in 2 .. L - 1:
15         RRround = @[ ]
16         tmp = Info[0][k].value
17         x = SIG[0][k - 2]; y = SIG[0][k - 1]
18         RR = toInt(allCodeFun([x, y], COEFF, funType))
19         if not detectCollHard(tmp, RR):
20             SIG[0][k] = theFWN(RR[tmp], M)
21             continue

```

## Продолжение таблицы 1

```

22     (uniqueVals, inds) = uniqueElems(RR)
23     i = 0
24     x = y; y = theFWN(RR[i mod N], M)
25     RR = toInt(allCodeFun([x, y], COEFF, funType))
26     val = RR[tmp]
27     if isOnly(val, RR) and (val not in uniqueVals):
28         SIG[0][k] = theFWN(val, M)
29         continue
30     i = 1
31     add(RRround, @[RR])
32     x = y; y = theFWN(RR[i mod N], M)
33     RR = toInt(allCodeFun([x, y], COEFF, funType))
34     while not isOnly(RR[tmp], RR) or
35         (RR[tmp] in uniqueVals) or
36         containsUniqueElemInRow(RRround, RR[tmp]):
37         i += 1
38         add(RRround, @[RR])
39         x = y; y = theFWN(RR[i mod N], M)
40         RR = toInt(allCodeFun([x, y], COEFF, funType))
41     SIG[0][k] = theFWN(RR[tmp], M)

```

Поясним назначение инструкций программы построчно.

Строка 1

Алгоритм кодирования вынесен в отдельную подпрограмму для переиспользования кода в различных приложениях. Вектор «SIG» – множество значений кодированного сигнала; задается как множество нулей в основной программе. «Info» – передаваемая информация; количество блоков:  $L - 2$ , поскольку первые два отсчета содержат начальные условия. «COEFF» – матрица коэффициентов системы кодирующих функций (2). «funType» – тип функции двух переменных; для данной версии библиотеки их 5. Функции определены в [5].

Все операции осуществляются в конечном поле Галуа размерности  $GF\{2^M\}$ . Численные объекты «theFWN», представленные в коде, полностью идентичны целочисленным объектам  $f_i$ , реализованным в библиотеке `finmath` среды MATLAB.

Строка 2

Начало блока инициализации неизменяемых параметров кодера.

Строка 3

$M$  – разрядность вычислительного устройства, определяемая через нулевой отсчет сигнала, в котором хранится одно из двух начальных состояний динамической системы.

Строка 4

$N = 2^Q$  – количество состояний информационного процесса. Численно оно равно количеству строк кодирующей матрицы (2).

Строка 5

Определение длительности наблюдения сигнала через количество отсчетов  $L$ . В проведенном численном исследовании оно варьировалось и составляло от  $1 \cdot 10^4$  до  $\sim 7 \cdot 10^{11}$ .

Строка 6

Начало блока инициализации изменяемых величин и переменных.

Строки 7–13

$x = h_{k-1}$ ;  $y = h_{k-2}$ ; «RR» и «RRround» – векторы базового и раундового вычислений системы функций, определяемых (2). «REF» – вектор эталонных чисел, хранящий все допустимые значения нелинейной системы; необходимо для отладки кодера. Остальные переменные вспомогательные.

Строка 14

Начало цикла, реализующего рекуррентное вычисление сигнально-кодовой конструкции.

Строка 15

Инициализация пустого множества результатов вычисления раундов.

Строка 16

Заносим в переменную «tmp» значение кодируемого отсчета.

Строка 17

Определение двух предыдущих состояний системы.

Строка 18

Вычисляем систему нелинейных порождающих функций, определяемых коэффициентами (2).

Строка 19–21

Базовый раунд: проверка на отсутствие неоднозначностей для информационного значения «tmp». Если проверка дает положительный ответ, то система переходит к кодированию следующего информационного значения. Если условие не выполняется, то алгоритм начинает вычисление раундов каскадного кода.

Строка 22

Определение уникальных значений на базовом раунде. Вектор «uniqueVals» необходим для исключения некоторых значений, которые могут появиться на следующих раундах кодирования (см. первое условие в (3)).

Строка 23

Установка счетчика раундов в ноль.

Строка 24

Модификация аргументов функции (3). Первому аргументу присваиваем значение второго, второму – одно из  $N = 2^Q$  значений, индекс которого равен  $(i \bmod N)$ .

Строка 25

Вычисление множества значений функции (3) на нулевом раунде.

Строка 26

Извлечение значения с индексом, равным кодируемому информационному состоянию.

Строка 27

Проверка выполнения всех условий (3)

Строки 28, 29

Если условия выполняются, закодированный отсчет заносится в сигнальный вектор и осуществляется переход к базовому раунду, выполняя инструкцию continue. Если не выполняются – вычисление раундов продолжается.

Строки 30–33

Фрагмент кода идентичен коду в строках 23–26. Необходимость определения нулевого и первого раунда вне цикла обусловлена невозможностью корректной обработки матрицы uniqueVals, если она содержит менее двух строк.

Строка 34

Начало основного цикла каскадного кодирования. Отдельного пояснения требует функция containsUniqueElemInRow, проверяющая важное условие в алгоритме (3). Логика ее работы состоит в проверке раундовой матрицы RRround на предмет уникальности закодированного состояния, по меньшей мере, в одной из строк матрицы. Если закодированное значение обнаруживается в качестве уникального, то результат будет true и кодер продолжит вычислять раунды. Реализация функции containsUniqueElemInRow представлена в таблице 2.

Очевидно, что с увеличением количества раундов вероятность такого события уменьшается, однако исследование показало, что в ряде случаев проверка завершается успехом на раундах с номерами, меньшими  $M$ .

Строки 35–38

Идентичны коду в строках 30–33.

Строка 39

Занесение закодированного отсчета в сигнальный вектор после успешной проверки всех условий. В реальных приложениях необходимо предусмотреть проверку матрицы коэффициентов системы порождающих функций на предмет отсутствия заикливания системы при вычислении раундов.

Таблица 2

**Алгоритм каскадного декодирования**

```

1  func containsUniqueElemInRow*(A: intMTX, val: int): bool {.inline.}
   =
2      if len(A) == -1: return false
3      var count: int
4      for p in 0..high(A):
5          count = 0
6          for V in A[p]:
7              if V == val: count += 1
8              if count == 1: return true
9      return false

```

containsUniqueElemInRow – узкоспецифичная функция, дающая ответ на вопрос, имеется ли значение val в качестве уникального и единственного элемента, по меньшей мере, в одной из строк матрицы A. Следует отметить, что если значение val встречается в строках матрицы A больше одного раза или отсутствует, то результат будет false.

Программная реализация алгоритм декодирования информационного сигнала (4) представлена в табл. 3.

Таблица 3

**Алгоритм вычисления логической функции containsUniqueElemInRow**

```

1  func theDecoder*(SIG: MTX, Info: var MTX, COEFF: MTX, funType: int)
   =
2      let
3          M = SIG[0][0].width
4          N = high(COEFF) + 1
5          L = size(SIG)[1]
6      var
7          x, y, probInfo: FWN
8          RR, res: seq[int]
9          i: int
10     var
11         ss, val, count: int
12     for k in 2 .. L - 1:
13         x = SIG[0][k - 2]; y = SIG[0][k - 1]; ss = SIG[0][k].value
14         RR = toInt(allCodeFun([x, y], COEFF, funType))
15         res = findIn(RR, ss)
16         if len(res) == 1:
17             Info[0][k] = theFWN(res[0], M)
18             continue
19         i = -1
20         res = @[]
21         while len(res) != 1:
22             i += 1
23             x = y; y = theFWN(RR[i mod N], M)
24             RR = toInt(allCodeFun([x, y], COEFF, funType))
25             res = findIn(RR, ss)
26         Info[0][k] = theFWN(res[0], M)

```

Алгоритм реализует выражение (4): в строке 16 проверяется первое условие; цикл в строках 21–25 вычисляет каскадный код до тех пор, пока не будет найдено уникальное значение, совпадающее с текущим состоянием принятого сигнала. Основная нагрузка для обеспечения однозначного декодирования СКК на стороне приема и обработки возложена на раундовый кодер.

**Заключение.** Отметим основные особенности представленного алгоритма каскадного кодирования-декодирования сигнально-кодовой конструкции для перспективных систем цифровой связи.

1. Задержка обработки сигнала составляет величину равную длительности блока информационного потока.

2. Как показали численные исследования касательно алгоритмов (1)–(3), кусочно-линейные и квадратичные порождающие функции формируют последовательности с приемлемыми характеристиками стохастизации и возможностью раундового кодирования информации за счет модификации аргументов НПФ специальным образом.

3. Модификация значения при реализации раундов обусловлена необходимостью исключения возникновения пар одинаковых аргументов, приводящих к заикливанию. Ситуация может возникать либо на паре одинаковых аргументов, либо на паре попеременно меняющихся аргументов. Указанное важно учитывать при практической реализации систем передачи информации.

Как и в любой другой системе с нелинейной динамикой в системе с раундовым подавлением коллизий возможны абнормальные заикливания с периодом, большим 3 отсчетов, при которых алгоритм находит некоторую локальную устойчивую траекторию. Поэтому для конкретной системы НПФ требуется прогонка на длительных интервалах кодирования. Для предложенного алгоритма вероятность выхода в равновесный цикл составляет около 0,07. То есть приблизительно каждая 14-я случайным образом выбранная система НПФ неприменима для задач кодирования информационных сообщений.

4. В процессе определения оптимального алгоритма модификации аргументов для каскадного кодирования был предпринят ряд подходов. Модификация значения до ближайшего большего целого числа дает хорошие и отличные результаты для всех типов функций по критерию минимизации количества раундов по подавлению коллизий, однако на длительных интервалах наблюдения система способна заикливаться.

Хорошие результаты дают «несимметричные» полиномы в качестве порождающих, то есть полиномы, в которых показатели степени отличаются. Среди всего многообразия полиномиальных функций наилучшие результаты дает НПФ следующего вида:

$$f(x, y) = p_1x + p_2xy + p_3y + p_4. \quad (6)$$

5. Наиболее мощный тест по проверке способности подавлять неоднозначности – это передача информационной последовательности с одинаковыми значениями  $2^{Q-1} - 1$ . Сравнительно сложно подобрать аргументы нелинейных порождающих функций, которые были бы способны сформировать непересекающиеся значения для  $i < 2^Q - 1$ , где  $i$  – номер кодирующей функции.

6. Для алгоритмов (1)–(4) можно определить два режима «выбивания» системы из равновесного состояния: мягкое и жесткое. Первый режим предполагает прибавление смещающей константы, второй – замену неоднозначного значения ближайшим большим простым числом. Смещающая константа может быть произвольной и является дополнительным ключом в системе декодирования информации.

7. В отличие от алгоритмов, предложенных в прежних исследованиях авторов, данный алгоритм не несет информационных потерь и хорошо адаптирован к совместному использованию с помехоустойчивым кодированием, однако требует больших вычислительных ресурсов при  $Q = M$ . Для  $Q < M$  ресурсоемкость представленных алгоритмов сопоставима.

8. Фундаментальное отличие представленных алгоритмов от известных и широко применяемых алгоритмов кодирования информации состоит в отсутствии на различных интервалах наблюдения предсказуемых значений отсчетов сигнала при одинаковых информационных фрагментах. Иначе говоря, информационная последовательность 7, 15, 12, 0, 3 (0111, 1111, 1100, 0000, 0011 – в двоичном представлении) в различные моменты времени будет давать на выходе кодера различные, заранее непредсказуемые сигнальные отсчеты.

*Представленные в статье материалы получены в результате проведения фундаментальных исследований, выполняемых по заказу Министерства связи и информатизации Республики Беларусь в рамках договора ФИ 06-21 от 29.11.2021 г. на комплексное задание «Современные беспроводные системы передачи данных» на 2021–2025 годы в составе Государственной программы научных исследований «Цифровые и космические технологии, безопасность человека, общества и государства 1.5.6» подпрограммы 5.1 «Цифровые технологии и космическая информатика».*

## CASCADE INFORMATION ENCODING ALGORITHM FOR SECURED DIGITAL DATA COMMUNICATION SYSTEMS

V.V. DUBROUSKI, H.I. DULKEVICH

### Abstract

The article considers a digital algorithm for cascade coding of an information signal by a system of nonlinear generating functions defined on a finite set of values, which ensures an increase in the spectral efficiency of the signal-code design for 5G mobile digital communication systems of the terrestrial telecommunication systems. Numerical programming of the algorithm is implemented. The main means of practical implementation are discussed.

### Список литературы

1. Gokyildirim, A. A novel five-term 3D chaotic system with cubic nonlinearity and its microcontroller-based secure communication implementation / A. Gokyildirim, U. Kocamaz, Y. Uyaroglu // CalganInternational Journal of Electronics and Communications. – 2023. – Vol. 160 (2). – P. 154497.
2. Meng, Fan-Qi A color image encryption and decryption scheme based on extended DNA coding and fractional-order 5D hyper-chaotic system / Fan-Qi Meng, Gang Wu // Expert Systems with Applications. – 2024. – Vol. 254. – P. 124413
3. Gokyildirim, A. Parametric fractional-order analysis of Arneodo chaotic system and microcontroller-based secure communication implementation / A. Gokyildirim [et al.] // AkgulInternational Journal of Electronics and Communications. – 2024. – Vol. 175. – P. 155080.
4. Yan, Y. An innovative orthogonal matrix based on nonlinear chaotic system for compressive sensing / Yanjun Yan, [et al.] // Chaos, Solitons & Fractals. – 2024. – Vol. 178. – P. 114319.
5. Dubrouski, V. V. The Algorithm of Nonlinear Data Coding and Decoding by Fixed Point Transformations for Secured Mobile Digital Communication Systems / V. V. Dubrouski, H. I. Dulkevich // Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (IEEE). – 2024. – С. 98–102.
6. Дубровский, В. В. Алгоритм нелинейного кодирования и декодирования информационного потока методами целочисленных преобразований для информационно защищенных систем подвижной цифровой связи / В. В. Дубровский, А. И. Дулькевич // Проблемы инфокоммуникаций. – 2023. – № 2 (18). – С. 13–23.



DOI: 10.61726/8430.2024.79.98.001

УДК 004.031, 621.396.4

**РАЗНЕСЕННЫЙ РАДИОПРИЕМ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИИ MASSIVE MIMO**Г.И. МЕЛЬЯНЕЦ<sup>1</sup>, Н.Г. ПРАШКОВИЧ<sup>2</sup>, О.В. КОЧЕРГИНА<sup>3</sup>, В.В. БОЖЕНКОВ<sup>4</sup>,  
Н.В. ДОМБРОВСКИЙ<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Учреждение образования «Белорусская государственная академия связи»,  
ул. Ф. Скорины, 8/2, Минск, 220076, Беларусь  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-0658-6008>

<sup>2</sup>Учреждение образования «Белорусская государственная академия связи»,  
ул. Ф. Скорины, 8/2, Минск, 220076, Беларусь  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4170-987X>

<sup>3</sup>Учреждение образования «Белорусская государственная академия связи»,  
ул. Ф. Скорины, 8/2, Минск, 220076, Беларусь  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3597-0395>

<sup>4</sup>Учреждение образования «Белорусская государственная академия связи»,  
ул. Ф. Скорины, 8/2, Минск, 220076, Беларусь  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5999-0358>

<sup>5</sup>Научно-исследовательское унитарное предприятие «Институт цифрового телевидения горизонт»,  
ул. Куйбышева, д. 35, пом. 1, Минск, 220029, Беларусь  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-7282-3235>

Поступила в редакцию 20 марта 2024

В работе представлены результаты исследования возможностей снижения вероятности ошибки принимаемого сигнала при организации разнесенного радиоприема для технологии Massive MIMO. MIMO – это метод пространственного кодирования сигнала, позволяющий увеличить полосу пропускания канала, который применялся в WiMAX и 4G. Показано, что применение разнесенного приема позволяет существенно уменьшить вероятность ошибки по сравнению с одиночным приемом флуктуирующих сигналов. А использование технологии Massive MIMO позволяет увеличить скорость передачи. Способность MIMO одновременно обслуживать нескольких пользователей в сжатой области, поддерживая высокую скорость передачи данных и стабильную производительность, делает эту технологию идеальной для удовлетворения потребностей 5G.

*Ключевые слова:* технология MIMO, временное разнесение приема, пространственное разнесение приема, поляризационное разнесение приема, вероятность ошибки приема.

**Введение.** Технология Massive MIMO определенно является основным компонентом сверхбыстрых сетей 5G, которые начали внедряться с конца 2019 года [1–4]. MIMO (Multiple Input Multiple Output) – это метод пространственного кодирования сигнала, позволяющий увеличить полосу пропускания канала, который применялся в WiMAX и 4G. При реализации 5G данный метод был значительно усовершенствован, в частности, в многопользовательском режиме MU-MIMO (Multi-User-MIMO) в базовых станциях 5G gNodeB (gNB), антенны которых состоят из матрицы излучающих элементов, использующих два диапазона частот.

Стандартные сети MIMO имеют тенденцию использовать две или четыре антенны. Massive MIMO представляет собой систему с особенно большим количеством антенн. Например, Huawei, ZTE и Facebook продемонстрировали системы Massive MIMO с числом антенн от 96 до 128. Фирма

Эрикссон презентовала аналогичное оборудование AIR 6468, использующее 64 передающие и 64 приемные антенны [5].

Значительно большее число антенн позволяет умножить емкость беспроводного соединения без увеличения полосы частот, повысить производительность системы, повысить устойчивость к помехам и защищенность системы от несанкционированного доступа, а также устойчивость к воздействию устройств, передающих в более высоких частотных диапазонах. Кроме того, появляется возможность организовать новые решения мультиплексирования, демультимплексирования и управления. Такие технологии будут использоваться в двух диапазонах частот: FR1 и FR2 согласно 3GPP TS 38.211 V1.2, что увеличивает варианты использования многомерных сигналов.

Несмотря на рост интереса к данной технологии и большое число публикаций, остается много вопросов, связанных с реализацией доступа в таких системах. Таким образом, целью данной работы является анализ возможностей снижения вероятности ошибки принимаемого сигнала при организации разнесенного радиоприема для технологии Massive MIMO.

**Методика организации разнесенного радиоприема.** Особенностью и преимуществом технологии Massive MIMO является добавление новых частотных диапазонов согласно требованиям к скорости передачи сигналов, увеличение числа параллельных каналов, рост трафика многочисленных приложений 5G (таблица), увеличение числа приемопередатчиков и фазированной антенной решетки при уменьшении размеров и наличии узконаправленного излучения, покрывающего потребности пользователя [6]. К парному радиоресурсу (DL + UL) с частотным или временным дуплексом может быть назначен непарный SUL или SDL канал. Тогда UE в одной соте получает  $1 \times DL$  и  $2 \times UL$  канала, использование которых контролируется сетью. В таком случае технологии Massive MIMO получают новое направление развития и использования.

Таблица

**Распределение участков спектра**

Частотный диапазон	Технология, сфера применения
694–790 МГц	IoT («Умный дом» и «Умный город»), не парный SUL или SDL канал 5G
3,4–3,8 ГГц	Подключение самоуправляемых автомобилей, роботов
24,2–27,5 ГГц	3D-видео в формате UHD, AR/VR
37,0–43,5 ГГц	Облачные сервисы, голографическая связь, тактильный интернет

Технология Massive MIMO использует недорогие, простые в установке и обслуживании маломощные базовые станции с антеннами, которые можно размещать на мачтах уличного освещения, на стенах домов и других объектах. Такая система формирует много лучей, один из которых предназначен для одного пользователя в соответствии с его потребностями (из OFDMA-мультиплекса выделяется необходимое количество ресурсных блоков, удовлетворяющее заказанную пользователем услугу). Благодаря Massive MIMO и формированию луча такой процесс обрабатывается наиболее рационально и эффективно: скорость передачи данных и задержка будут намного более равномерными по всей сети. Это дает возможность усиливать уровень сигнала для конкретного пользователя, в то же время минимизируя влияние данного сигнала на других пользователей.

Для повышения эффективности и достоверности приема используются различные средние частоты (разнесение по частоте) или передача в разные отрезки времени (разнесение по времени). Дополнительное применение получили метод приема сигналов на разнесенные антенны, находящиеся друг от друга на расстоянии нескольких длин волн (пространственное разнесение приема), или метод приема различных поляризационных составляющих электромагнитного поля (поляризационное разнесение приема) [7]. При реализации метода пространственного разнесения сигнал излучается через антенну, имеющую две линейные поляризации (вертикальную или горизонтальную), с соответствующим снижением мощности в каждом канале на 3 дБ. Если на приеме используется одна кросс-поляризованная антенна, то сигналы в разных каналах могут отличаться по уровню на 10–12 дБ.

Эффективность того или иного метода разнесенного приема во многом определяется способом обработки разнесенных сигналов на приемной стороне.

Среди линейных методов объединения ветвей большое распространение в технике пространственного разнесенного приема получили простое и оптимальное линейное сложение сигналов. При этом результирующее колебание на выходе схемы объединения представляет собой линейную комбинацию  $M$  входных колебаний отдельных ветвей разнесения:

$$U_p(t) = \sum_{i=1}^M k_i \cdot U_i(t), \tag{1}$$

где  $i$  – порядковый номер ветви;  $k_i$  – весовые коэффициенты, величина которых зависит от конкретного метода объединения ветвей;  $U_i(t)$  – сигнал, принятый в  $i$ -ой ветви.

При этом принятый сигнал определяется как:

$$U_i(t) = \mu_i S(t) + n_i(t), \tag{2}$$

где  $S(t)$  – переданный сигнал;  $\mu_i$  – коэффициент передачи, зависящий от условий распространения сигнала;  $n_i(t)$  – помеха в  $i$ -й ветви.

В соответствии с принципами работы системы автовыбора огибающая сигнала на выходе схемы объединения представляет собой случайную величину, определяемую как максимальное значение принятого сигнала в  $i$ -ой ветви, где  $i$  может меняться случайно от одного интервала анализа состояния ветвей к другому.

В этой системе путем переключения приемников из  $M$  ветвей выбирается та, в которой сигнал имеет наибольшее значение. Для такой системы коэффициенты в выражении (1) выбираются следующим образом:

$$k_i = \begin{cases} 1, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases} \tag{3}$$

Оценку различных систем разнесенного приема производят по вероятности ошибки. Если замирания в отдельных ветвях неселективные и определяются законом Рэлея, то вероятность ошибки в рассматриваемой системе авто выбора может быть рассчитана по формуле:

$$p_M = \frac{1}{2} \cdot \frac{M!}{\left(1 + \frac{\rho^2}{2}\right) \cdot \left(2 + \frac{\rho^2}{2}\right) \dots \left(M + \frac{\rho^2}{2}\right)}, \tag{4}$$

где  $\rho$  – отношение сигнал/шум в  $i$ -ой ветви на входе приемника.

Если среднее значение отношения сигнал/шум в ветвях значительно превышает 1, то формулу (4) можно упростить и записать как:

$$p_M \approx \frac{M!}{2} \cdot \left(\frac{2}{\rho^2}\right)^M. \tag{5}$$

**Имитационное моделирование.** Для упрощения модели многолучевой обработки с большим количеством параллельных каналов используем имитационную модель MIMO 4Tx2Rx, что имитирует в UE два канала приема и четыре передачи. На данном этапе это является достаточным для проведения имитационного исследования (рис. 1).

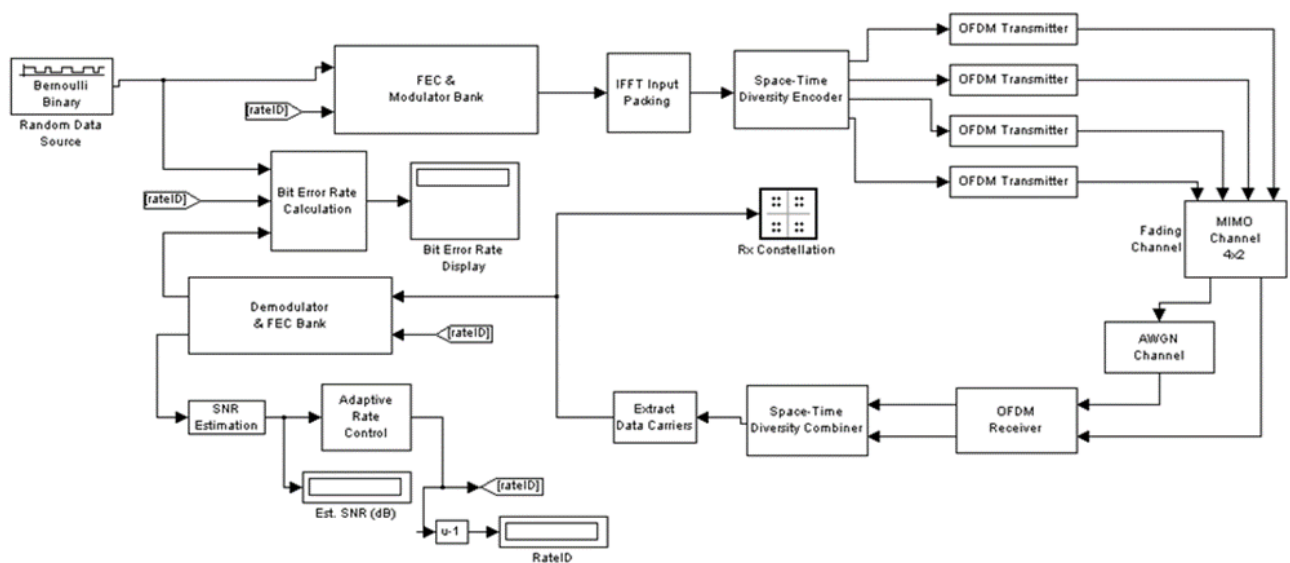


Рис. 1. Схема модели системы MIMO 4Tx2Rx в среде MATLAB

Генератор двоичных сигналов Бернулли (Bernoulli Binary) формирует случайный цифровой поток, воздействующий на устройства, в которых проводится базовая обработка. К базовой обработке относится помехоустойчивое кодирование с использованием низкоплотных и полярных кодов (FEC&Modulator Bank), затем осуществляется обратное быстрое преобразование Фурье (IFFT Input Packing), затем пространственно-временное кодирование на основе алгоритма Аламути (Space-Time Diversity Encoder), где один поток разделяется на четыре и воздействует на четыре передатчика (OFDM Transmitter) и затем воздействует на модель линии связи (MIMO Channel  $4 \times 2$ ). Далее два радиосигнала обрабатываются в приемнике (OFDM Receiver), при этом один радиосигнал обрабатывается в линии связи с аддитивным шумом Гаусса (AWGN). В тракте приема осуществляется обратная обработка, которая заключается в обратном пространственно-временном декодировании (Space-Time Diversity Combiner), прямом быстром преобразовании Фурье (Extract Data Carriers), демодуляции помехоустойчивого кода (Demodulator&FEC Bank). Для контроля вероятности ошибки отношения сигнал/шум и скорости передачи используются дисплеи Bit Error Rate, SNR и Rate ID. Модель позволяет исследовать большинство технических характеристик технологии 5G NR.

**Результаты измерений и их обсуждение.** Модель, представленная на рис. 1, позволяет осуществить ряд вариантов разнесенного приема, отличающихся способами объединения и разъединения ветвей, помимо изменения видов базовой обработки. На рис. 2 приведены результаты исследования зависимости вероятности ошибки BER от отношения сигнал/шум SNR при различных сочетаниях числа передающих и принимающих лучей. Варианты, содержащие четыре передающих луча и один или два приемных (4T1R и 4T2R), соответствуют технологии MIMO, один передающий и один приемный (1T1R) – технологии SISO. Как видно из рис. 2, наилучшими параметрами обладает вариант 4T2R. Вероятность ошибки BER составляет сотые доли при почти равенстве уровней сигнала и шума. Средними параметрами обладает вариант для четырех лучей передачи и одного приема, и худшими, когда используется SISO.

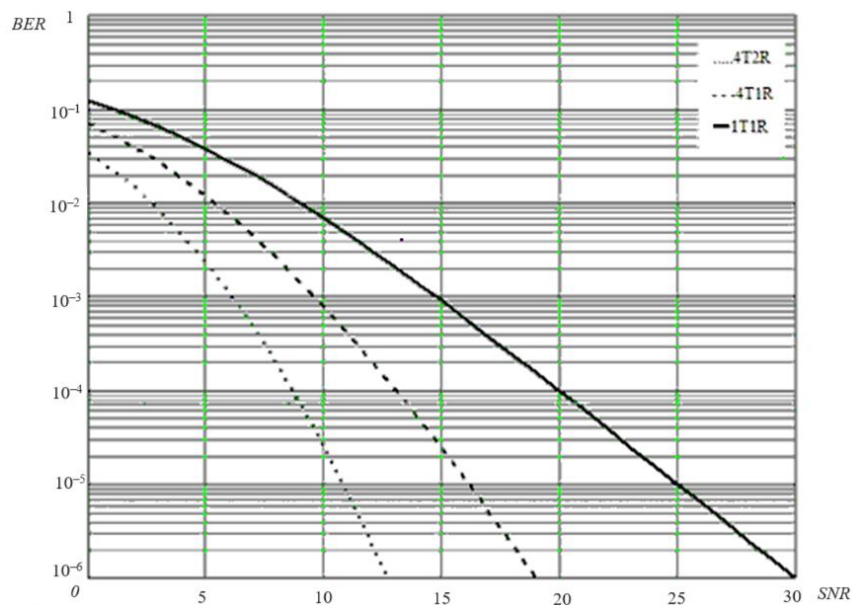


Рис. 2. Результат исследования BER от SNR в среде MATLAB

В представленной модели используется вид многократной многопозиционной модуляции QAM 256, что также является особенностью сетей 5G NR. На рис. 3 представлено сигнальное созвездие, представляющее сигналы на комплексной плоскости. На сигнальном созвездии наблюдается изменение помехоустойчивости приема. Из рис. 3 видно, что на систему действуют шумы и появляется фазовое рассогласование, и положение стационарной точки созвездия QAM 256 изменяется. Для одной стационарной точки появляется прием  $n$  лучей. Положение стационарной точки меняется, потому что на каждый луч воздействуют помехи и изменяется его длина пути. Фазовое рассогласование является случайной величиной, которая при определенных условиях может быть представлена нормальным законом распределения случайной величины. При этом систематическая составляющая будет определять уровень фазовых нелинейных преобразований и установленную

в синхронном режиме работу. Под воздействием помех изменяется амплитуда в лучах векторов в плоскости I и в плоскости Q, что влияет и на фазу. А под действием многолучевой обработки каждый луч обрабатывается отдельно, что позволяет корректировать прием сигнала при использовании технологии MIMO. Энергия каждого луча суммируется и улучшает отношение сигнал/шум, что подтверждается предыдущим исследованием.

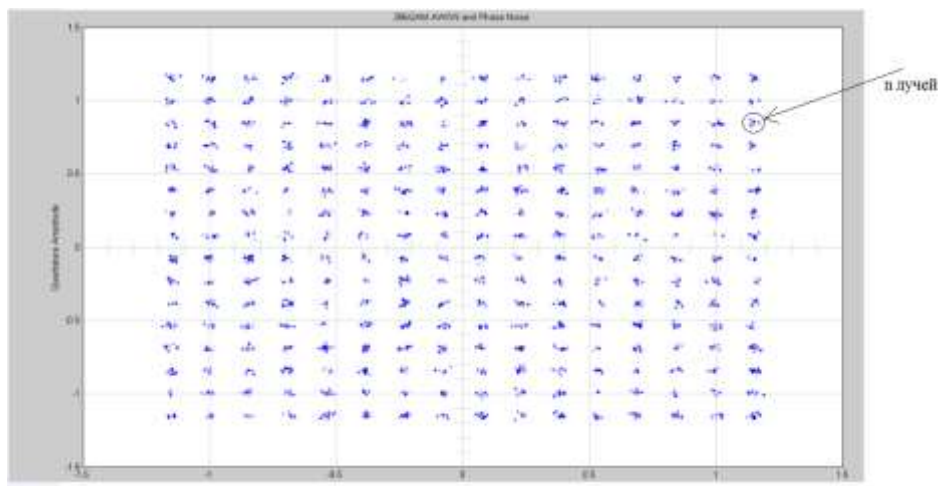


Рис. 3. Сигнальное созвездие QAM256 в среде MATLAB

На рис. 4 представлено распределение спектральной плотности сигнала QAM256, полученное в среде MATLAB. Из рис. 4 следует, что полоса частот принимаемого сигнала составляет 1,6 ГГц на уровне 110 дБ/Гц и используется приемником 2 раза. Это позволяет реализовать скорость передачи 3,2 Гбит/с.

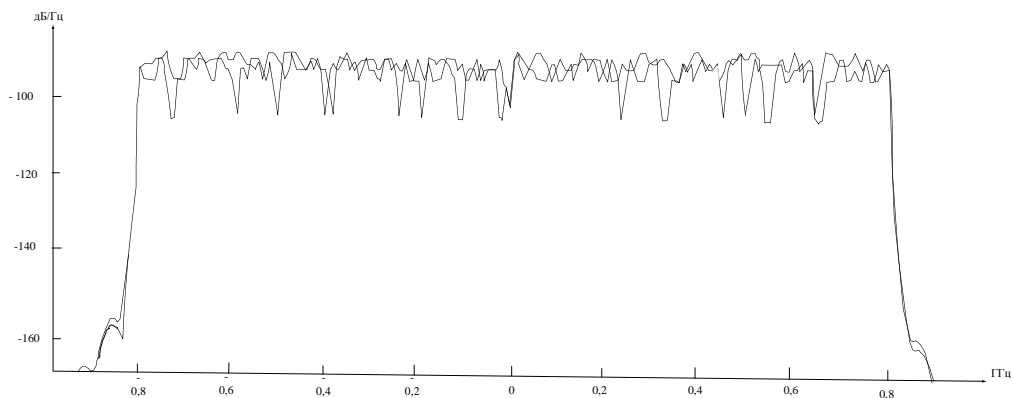


Рис. 4. Распределение спектральной плотности сигнала QAM256 в среде MATLAB

Из представленных результатов следует, что увеличение числа ветвей при одном и том же отношении сигнал/шум приводит к уменьшению вероятности ошибки. Так, при увеличении отношения сигнал/шум в диапазоне от 10 до 30 дБ зависимость проявляется наиболее значительно. Дальнейшее увеличение отношения сигнал/шум на величину вероятности ошибки существенного влияния не оказывает. Увеличение числа ветвей приводит к уменьшению вероятности ошибки. Данная зависимость линейна. Коэффициент линейности можно определить как отношение  $\Delta \text{SNR} / \Delta i$ , где  $\Delta \text{SNR}$  – изменение отношения сигнал/шум при изменении числа ветвей  $\Delta i$ . Тогда  $\Delta \text{SNR} / \Delta i = 4,4 \times 10^{-2}$ ;  $5,5 \times 10^{-6}$  и  $2,2 \times 10^{-6}$  при  $\text{SNR} = 1$ ; 50 и 300, соответственно.

Увеличение кратности модуляции с 64QAM, которая образована  $2^6$  несущих на 256QAM, позволяет увеличить скорость передачи в 4 раза и это результат улучшения базовой обработки. При этом могут использоваться модуляционно-кодирующие схемы с применением QPSK, 16QAM, 64QAM и 256QAM, что позволяет работать с разным отношением сигнал/шум в канале связи, не теряя связь, а уменьшая скорость передачи.

Таким образом, применение разнесенного приема позволяет существенно уменьшить вероятность ошибки по сравнению с одиночным приемом флуктуирующих сигналов. А использование технологии Massive MIMO позволяет увеличить скорость передачи.

**Заключение.** Представленная модель системы в каждый момент времени определяет коэффициент передачи. На основе полученных данных можно предугадывать коэффициент передачи каждого канала и составлять соответствующую матрицу.

Способность MIMO одновременно обслуживать нескольких пользователей в сжатой области, поддерживая высокую скорость передачи данных и стабильную производительность, делает эту технологию идеальной для удовлетворения потребностей 5G.

## RADIO DIVERSITY FOR MASSIVE MIMO TECHNOLOGY

G.I. MELYANETS, N.G. PRASHKOVICH, O.V. KOCHERGINA, V.V. BOZHENKOV,  
N.V. DOMBROVSKY

### Abstract

The paper presents the results of a study of the possibilities of reducing the probability of received signal error when organizing diversity radio reception for Massive MIMO technology. MIMO (Multiple Input Multiple Output) is a spatial signal encoding method that allows you to increase channel bandwidth, which was used in WiMAX and 4G. It is shown that the use of diversity reception can significantly reduce the probability of error compared to single reception of fluctuating signals. And the use of Massive MIMO technology allows you to increase the transmission speed. MIMO's ability to simultaneously serve multiple users simultaneously in a compressed area while maintaining high data rates and stable performance makes it ideal for meeting 5G needs.

### Список литературы

1. Степанец, И. Особенности реализации Massive MIMO в сетях 5G / И. Степанец, Г. Фокин // Первая миля. – 2018. – № 1. – С. 44–50.
2. Аверина, Л. И. Методы предварительного кодирования для систем связи с технологией Massive MIMO / Л. И. Аверина, П. А. Токарев // Вестник ВГУ. Серия : физика. Математика. – 2021. – № 3. – С. 5–14
3. Khwandah, S. A. Massive MIMO Systems for 5G Communications / S. A. Khwandah [et al.] // Wireless Personal Communications. – 2021. – P. 2101–2115.
4. Zheng, J. Mobile Cell-Free Massive MIMO : Challenges, Solutions, and Future Directions / J. Zheng [et al.] // IEEE. – 2023. – P. 1–9
5. Коняева, О. С. Моделирование системы MIMO в канале с памятью / О. С. Коняева // Инфокоммуникационные системы. – 2014. – Т. 12, № 3. – С. 32–36.
6. Степутин, А. Н. Мобильная связь на пути к 6G. Том 1 / А. Н. Степутин, А. Д. Николаев // Вологда : Инфра-Инженерия, 2021. – 384 с.
7. Степутин, А. Н. Мобильная связь на пути к 6G. Том 2 / А. Н. Степутин, А. Д. Николаев // Вологда : Инфра-Инженерия, 2021. – 420 с.
8. Феер, К. Беспроводная цифровая связь. Методы модуляции и расширения спектра / К. Феер. – М. : Радио и связь. – 2000. – 521 с.
9. Слюсар, В. Системы MIMO : принципы построения и обработка сигналов / В. Слюсар // Электроника : Наука, Технология, Бизнес. – 2005. – № 8. – С. 52–58.
10. Буснюк, Н. Н. Системы мобильной связи : учебное пособие для СПО / Н. Н. Буснюк, Г. И. Мельянец. – Санкт-Петербург : Лань. – 2022. – 128 с.
11. Van Chien, T. Massive MIMO Communications / T. Van Chien, E. Björnson // Book Chapter. – 2017. – P. 77–116.

**ТЕХНОЛОГИИ СВЯЗИ**

DOI: 10.61726/4278.2024.14.14.001

УДК 621.391.64

**ВОЗДЕЙСТВИЕ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР НА ОПТИЧЕСКОЕ ВОЛОКНО**И.Р. ГУЛАКОВ<sup>1</sup>, Я.А. ЗЕНЕВИЧ<sup>2</sup>, Т.А. МАТКОВСКАЯ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет,  
пр. Независимости, 4, Минск, 220030, Беларусь  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7330-9928>

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет,  
пр. Независимости, 4, Минск, 220030, Беларусь  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-8911-1377>

<sup>3</sup>Учреждение образования «Белорусская государственная академия связи»,  
ул. Ф. Скорины, 8/2, Минск, 220076, Беларусь  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1499-6158>

Поступила в редакцию 21 ноября 2024

Исследовано влияние локального температурного воздействия в диапазоне температур от 25 до 1000 °С на характеристики оптических волокон, применяемых в волоконно-оптических линиях связи. Получено, что тепловое воздействие в интервале температур от 25 до 900 °С не оказывает никакого влияния на характеристики исследуемых оптических волокон. Вносимые тепловым воздействием потери мощности передаваемого оптического излучения в интервале от 900 до 1000 °С зависели от температуры и продолжительности этого воздействия, а также типа и марки оптического волокна.

*Ключевые слова:* оптическое волокно, температурное воздействие, потери мощности, оптоволоконный кабель.

**Введение.** В настоящее время для передачи данных находят широкое применение волоконно-оптические линии связи [1–3]. Волоконно-оптическая линия связи представляет собой систему передачу данных, в которой информация транслируется по оптоволоконному кабелю. В процессе эксплуатации волоконно-оптических линий связи возможно возникновение различного рода чрезвычайных ситуаций, при которых температура оптоволоконного кабеля может значительно повышаться.

Основой любого оптоволоконного кабеля является оптическое волокно. Поэтому важно знать, каким образом изменяются характеристики оптических волокон при достаточно высоких температурах. На данный момент времени не установлена зависимость потерь мощности оптического излучения от температуры для различного вида и марок оптических волокон, поэтому установление такой зависимости является целью данной статьи.

**Экспериментальная установка и методика исследований.** В качестве объектов исследования были выбраны многомодовое оптическое волокно G.651 и одномодовые оптические волокна G.652, G.655 и G.657 как наиболее часто использующиеся в оптоволоконных кабелях.

Для исследования теплового воздействия при высоких температурах на характеристики оптических волокон была создана экспериментальная установка, структурная схема которой представлена на рис. 1.

Принцип действия экспериментальной установки следующий. Оптическое излучение от источника ИИ через оптическое волокно ОВ поступало на измеритель мощности. Мощность оптического излучения источника ИИ составляла 1 мВт, длина волны 1310 нм. Такая длина волны

и мощность источника излучения были выбраны, поскольку они наиболее часто используются для передачи данных по оптическим волокнам в волоконно-оптических линиях связи [4]. Длина оптического волокна ОВ составляла не более 2 м, что позволяло не учитывать потери мощности оптического излучения при начальной температуре исследований 25 °С. Отметим, что потери мощности передаваемого оптического излучения составляли при этой температуре  $\leq 0,4$  дБ/км и  $\leq 1,0$  дБ/км для одномодовых и многомодового оптических волокон, соответственно.

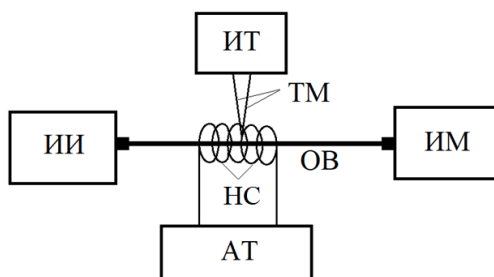


Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки:

ИИ – источник излучения; ИМ – измеритель мощности; ОВ – оптическое волокно; ИТ – измеритель температуры; ТМ – термопара; НС – нихромовая спираль; АТ – автотрансформатор

Нагревание оптического волокна осуществлялось при помощи нихромовой спирали НС (рис. 1). Для этого через спираль пропускался электрический ток. Температура нагрева спирали зависела от величины протекающего через нее электрического тока. Величину этого тока можно изменять автотрансформатором АТ. Температура нагрева оптического волокна контролировалась с помощью термопары ТМ, подключенной к измерителю температуры ИТ.

Измерения выполнялись в диапазоне температур от 25 до 1000 °С. Нижняя граница этого диапазона соответствует комнатной температуре. Верхняя граница была выбрана исходя из величины термостойкости исследуемых оптических волокон.

Потери мощности передаваемого оптического излучения  $D_{\text{п}}$  при локальном нагреве оптического волокна определялись по формуле:

$$D_{\text{п}} = 10 \lg \left( \frac{P}{P_{\text{в}}} \right), \quad (1)$$

где  $P$  – мощность источника излучения ИИ;  $P_{\text{в}}$  – мощность оптического излучения, поступающая на измеритель мощности ИМ.

В процессе проведения измерений существовала возможность отключать источник излучения ИИ от оптического волокна ОВ. В этом случае определялась мощность оптического излучения, вызванная свечением нихромовой спирали, поступающим в волокно ОВ через его боковую поверхность.

**Результаты измерения и их обсуждение.** При проведении исследований определялось влияние температуры  $T$  локального теплового воздействия на величину потерь мощности  $D_{\text{п}}$ . Полученные зависимости представлены на рис. 2. Данные зависимости получены при времени теплового воздействия 10 с. Отметим, что для многомодового оптического волокна при  $T = 25$  °С, а также при повышении температуры в исследуемом температурном диапазоне увеличение потерь мощности не наблюдалось.

Как следует из полученных зависимостей, для одномодовых оптических волокон в интервале температур от 900 до 1000 °С наблюдался рост величины потерь мощности оптического излучения. Так, при локальном тепловом воздействии с температурой 1000 °С потери мощности оптического излучения составляли 0,50; 0,10 и 0,05 дБ для оптических волокон G.652, G.655 и G.657 соответственно. Таким образом, наибольшая величина  $D_{\text{п}}$  наблюдалась для волокна G.652.

При увеличении длительности теплового воздействия вид этих зависимостей сохранялся, но увеличивались значения потерь мощности оптического излучения, полученные в интервале температур от 900 до 1000 °С. Независимо от времени воздействия в таком интервале температур наибольшее значение  $D_{\text{п}}$  наблюдалось для оптического волокна G.652. Такое отличие в поведении одномодовых оптических волокон разных марок связано с различной их внутренней структурой, отличием технологий и используемых материалов для их изготовления.



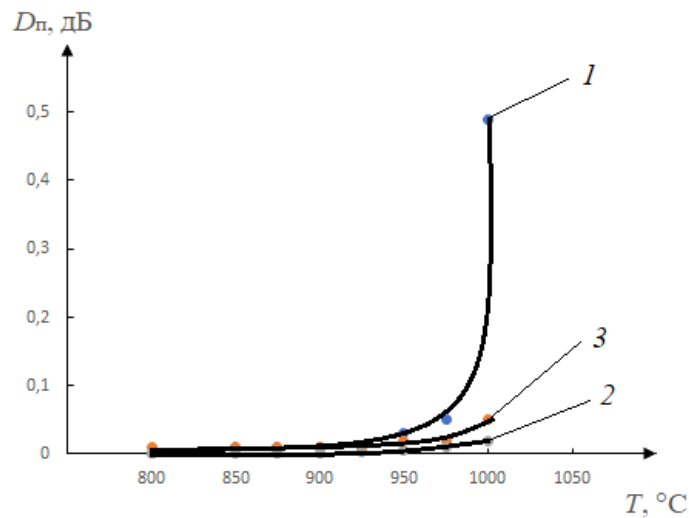


Рис. 2. Зависимость потери мощности оптического излучения от температуры теплового воздействия:  
1 – оптическое волокно G.652, 2 – G.655, 3 – G.657

Результаты исследования зависимостей потерь мощности оптического излучения от времени теплового воздействия на оптическое волокно показаны на рис. 3. Эти зависимости получены для температуры теплового воздействия 1000 °С. Как видно из представленных зависимостей, с ростом продолжительности теплового воздействия  $t$  от 0 до 50 с для оптических волокон G.655 и G.657 наблюдался рост величины  $D_{\text{п}}$ . При большей продолжительности теплового воздействия наблюдалось насыщение зависимости  $D_{\text{п}}$  от  $t$ . Для оптического волокна G.652 рост величины  $D_{\text{п}}$  происходил при продолжительности теплового воздействия  $t$  от 0 до 90 с, а затем наблюдалось насыщение зависимости  $D_{\text{п}}$  от  $t$ .

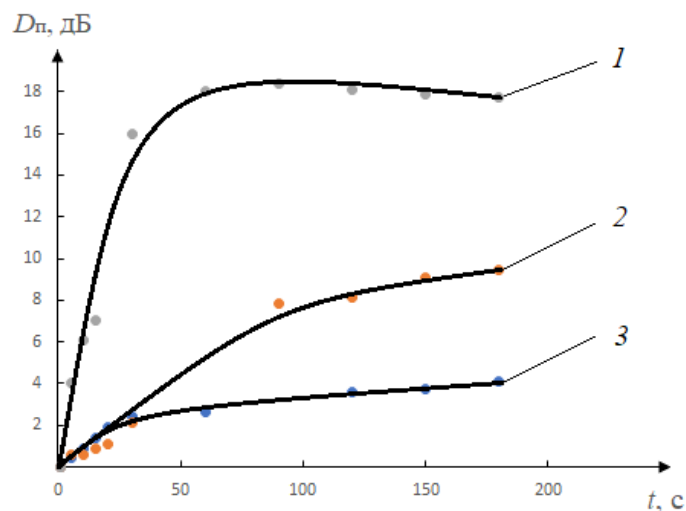


Рис. 3. Зависимость потери мощности оптического излучения от времени теплового воздействия:  
1 – оптическое волокно G.652, 2 – G.655, 3 – G.657

Наибольшие значения потерь мощности оптического излучения при температуре  $T = 1000$  °С и одинаковом времени теплового воздействия наблюдались для оптического волокна G.652, а наименьшие – для G.657.

Такое отличие в поведении зависимостей  $D_{\text{п}}$  от  $t$  для оптических волокон разных марок также связано с их различной внутренней структурой, отличием технологий и используемых материалов для их изготовления.

Аналогичные зависимости, полученные в интервале температур 900–1000 °С, имели такой же вид, как зависимости для температуры 1000 °С. Однако для температур из этого интервала значения потерь мощности  $D_{\text{п}}$  были меньше, чем для температуры 1000 °С. При этом времена, для которых наблюдалось насыщение зависимости  $D_{\text{п}}$  от  $t$ , оставались теми же, что и для 1000 °С.

Типичные зависимости мощности оптического излучения, вызванной свечением нихромовой спирали и поступившей в оптическое волокно ОВ через его боковую поверхность, от температуры нагрева этой спирали представлены на рис. 4. Данные зависимости были получены для оптического волокна G.652. Для других исследуемых одномодовых оптических волокон такие зависимости были аналогичными. Эти зависимости измерялись для случаев нагрева и охлаждения нихромовой спирали (рис. 4). При этом до начала нагрева оптическое волокно ОВ не подвергалось тепловому воздействию и не имело никаких дефектов.

Как следует из зависимостей, представленных на рис. 4, мощность поступившего в оптическое волокно излучения нихромовой спирали зависит от температуры ее нагрева. Чем больше нагрев спирали, тем большая мощность оптического излучения поступает в волокно. Однако эти зависимости, полученные при нагревании и охлаждении нихромовой спирали, отличаются. При нагревании оптическое излучение начинает поступать в волокно при температуре нагрева спирали выше 940 °С, а при охлаждении оптического волокна, поступившее в него излучение регистрировалось до 650 °С. Мощность поступающего в волокно оптического излучения нихромовой спирали зависела от величины потерь мощности, возникающей на дефекте, формируемом тепловым воздействием. Так, чем больше потери мощности оптического излучения на таком дефекте, тем большая мощность оптического излучения вводилась через этот дефект в волокно.

Величина потерь мощности, возникающих на таком дефекте, зависит от температуры теплового воздействия. Поэтому при нагревании волокна потери мощности оптического излучения на дефекте будут увеличиваться с ростом температуры. Наибольшее значение потерь мощности излучения будет соответствовать температуре 1000 °С. При охлаждении от этой температуры и ниже потери мощности на сформированном дефекте оставались такими же, как и при 1000 °С. Поэтому мощность оптического излучения, поступающего в волокно при охлаждении нихромовой спирали, будет большей чем для такой же температуры при нагревании. Также все это приводило к тому, что при охлаждении оптическое излучение поступает в волокно при более низких температурах, чем при нагревании.

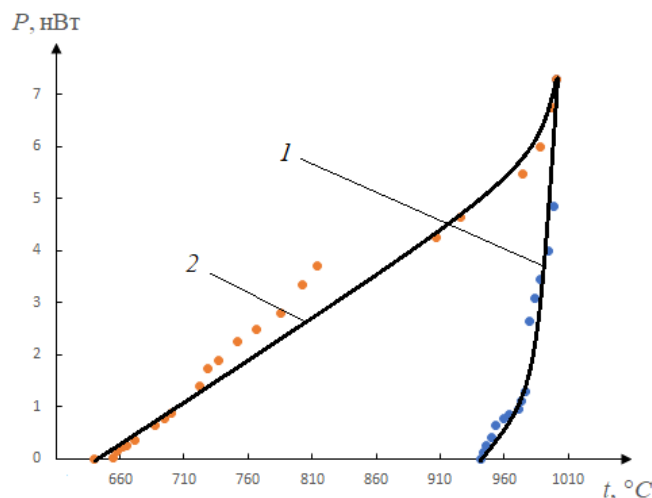


Рис. 4. Зависимость мощности оптического излучения, входящего в дефект, от нагретой нихромовой нити при нагревании (1) и охлаждении (2)

Отметим, что когда дефект от локального теплового воздействия на оптическое волокно при 1000 °С сформирован, то зависимости мощности оптического излучения нихромовой спирали, поступающего в оптическое волокно при нагревании и охлаждении, совпадали.

**Заключение.** Получено, что при локальном нагреве одномодовых оптических волокон в интервале температур от 900 до 1000 °С наблюдался рост величины потерь мощности передаваемого оптического излучения с увеличением температуры. Для многомодового оптического волокна при локальном нагреве в диапазоне температур от 25 до 1000 °С потери мощности излучения не наблюдались.

Установлено, что потери мощности оптического излучения зависят от времени теплового воздействия на волокно. При увеличении продолжительности теплового воздействия от 0 до 50 с для оптических волокон G.655 и G.657 и от 0 до 90 с для волокон G.652 наблюдался рост величины потерь мощности излучения, после чего потери мощности оптического излучения практически не наблюдались.

**THE EFFECT OF HIGH TEMPERATURES ON OPTICAL FIBER**

I.R. GULAKOV, Y.A. ZIANEVICH, T.A. MATKOVSKAIA

**Abstract**

The influence of local temperature action in the temperature range from 25 to 1000 °C on the characteristics of optical fibers used in fiber-optic communication lines was studied. It was found that thermal action in the temperature range from 25 to 900 °C does not have any effect on the characteristics of the studied optical fibers. The losses in the transmitted optical radiation power introduced by thermal action in the range from 900 to 1000 °C depended on the temperature and duration of this action, as well as the type and brand of optical fiber.

**Список литературы**

1. Фриман, Р. Волоконно-оптические системы связи / Р. Фриман. – М. : Техносфера, 2003. – 590 с.
2. Родина, О. В. Волоконно-оптические линии связи. Практическое руководство / О. В. Родина. – М. : Горячая линия-Телеком, 2009. – 400 с.
3. Портнов, Э. Л. Волоконная оптика в телекоммуникациях / Э. Л. Портнов. – М. : Горячая линия-Телеком, 2019. – 391 с.
4. Гулаков, И. Р. Компоненты волоконно-оптических линий связи : учеб. пособие / И. Р. Гулаков, А. О. Зеневич, Т. М. Мансуров. – Минск : Белорусская государственная академия связи, 2020. – 336 с.

DOI: 10.61726/2550.2024.38.67.001

УДК 621.391

## ИССЛЕДОВАНИЕ АТМОСФЕРНОГО КАНАЛА ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ НЕПРЯМОЙ ВИДИМОСТИ

С.И. ПОЛОВЕНЯ<sup>1</sup>, А.Н. СОЛОВЬЕВ<sup>2</sup>, А.Ф. КОРНЕЕВА<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Учреждение образования «Белорусская государственная академия связи»,  
ул. Ф.Скорины, 8/2, Минск, 220076, Беларусь  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1151-7625>

<sup>2</sup>Учреждение образования «Белорусская государственная академия связи»,  
ул. Ф.Скорины, 8/2, Минск, 220076, Беларусь  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9675-6766>

<sup>3</sup>Учреждение образования «Белорусская государственная академия связи»,  
ул. Ф.Скорины, 8/2, Минск, 220076, Беларусь  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-9730-235X>

Поступила в редакцию 17 ноября 2024

Рассматривается модель канала связи видимым светом. Представлены результаты моделирования имитационной модели системы связи видимым светом в канале не прямой видимости.

*Ключевые слова:* связь по видимому свету, оптический канал связи, лазерный диод, светодиод видимого спектра.

**Введение.** Современные коммуникационные технологии и информационные системы играют ключевую роль в развитии современных цифровых платформ, предоставляя новые и более эффективные способы обмена информацией. Такие технологии не только ускоряют передачу данных, но и делают ее более надежной и адаптированной к потребностям пользователей. Одним из ярких примеров таких инновационных подходов является технология Visible Light Communication (VLC), которая использует видимый свет в качестве среды для передачи данных. Развитием этой технологии является технология связи по видимому свету (CBC) или Li-Fi (Light Fidelity), которая способна обеспечивать высокоскоростную передачу информации, что делает ее особенно привлекательной для различных сфер применения, таких как умные дома, промышленные предприятия, транспортные системы и медицина.

Li-Fi привлекает внимание исследователей со всего мира благодаря своей способности использовать существующую инфраструктуру осветительных систем, превращая их в каналы передачи данных. Тем не менее, несмотря на все преимущества эффективность работы Li-Fi систем может значительно зависеть от внешних факторов, таких как уровень освещения, наличие физических препятствий, угол распространения света и даже погодные условия, если речь идет о применении на открытых пространствах.

Для обеспечения надежной передачи данных в системах Li-Fi важно учитывать особенности окружающей среды. Изменения уровня освещенности, например, при смене дня и ночи или использовании вблизи других источников света, могут создавать помехи для передачи сигнала. Кроме того, такие препятствия, как мебель, стены или движение объектов между передатчиком и приемником могут снижать эффективность системы. В связи с этим особое внимание уделяется разработке адаптивных алгоритмов, способных компенсировать влияние внешних факторов.

Для детального изучения возможностей и ограничений Li-Fi технологии необходимо провести комплексный анализ ее работы в различных условиях, который включает как компьютерное моделирование, позволяющее симулировать поведение системы при разных сценариях, так и натурные испытания, направленные на подтверждение теоретических выводов в реальной среде.

Кроме того, развитие Li-Fi технологий открывает перспективы для их сочетания с другими коммуникационными системами, такими как Wi-Fi и 5G, что может привести к созданию гибридных сетей с еще более высокими показателями производительности. Li-Fi может использоваться в качестве вспомогательной технологии в местах с высокой плотностью пользователей, таких как аэропорты, офисные здания или стадионы, где традиционные радиочастотные системы могут испытывать перегрузки.

**Моделирование системы передачи данных на основе видимого света.** В качестве базовой топологической конфигурации системы при моделировании используется топология точка-точка. Для упрощения имитационной модели процесс передачи информации в системе имеет симплексный (однонаправленный от источника к получателю) характер. Конфигурация беспроводной оптической линии связи вне прямой линии видимости (nonline-of-sight, NLOS).

Конфигурация NLOS считается одной из наиболее эффективных и универсальных для использования в помещениях. Она основывается на отражении сигналов от стен и потолка, что позволяет обходиться без прямой видимости между передатчиком и приемником. Для реализации этой конфигурации применяются передатчики с широким углом излучения и приемники с широким полем зрения. Такие ненаправленные каналы особенно удобны для широковещательных задач, например, для передачи данных в формате «один ко многим». Преимущества NLOS заключаются в повышенной надежности и удобстве использования, особенно для мобильных пользователей, так как наличие непрозрачных объектов на пути сигнала не оказывает значительного влияния на качество передачи данных [1, 2].

Однако эффективность NLOS может варьироваться в зависимости от множества факторов. Потери на оптическом пути зависят от размеров помещения и характеристик поверхностей, от которых происходит отражение. Например, зеркальные поверхности обеспечивают почти идеальное отражение, тогда как другие материалы приводят к значительным потерям мощности из-за диффузного рассеяния. Уровень отражения определяется длиной волны света, углом падения и текстурой поверхности, для анализа которой часто используется критерий Рэлея [1].

Помимо этого, конфигурация NLOS должна быть способна функционировать в условиях интенсивного фоновое освещения, где производительность канала связи может снижаться. Такое свойство делает ее особенно перспективной для создания надежных систем передачи данных в разнообразных внутренних условиях [3].

Импульсная характеристика оптического беспроводного канала вычисляется путем интегрирования мощности всех компонентов, поступающих на приемник после многолучевого распространения [4, 5].

В модели переменной  $\phi_r$  обозначен угол рассеивания светодиода. После прохождения расстояния  $d$  от светодиода до фотоприемника свет падает под углом  $\Psi_r$ , находящемся в поле зрения фотодиода. Расстояния между излучателем и точкой отражения световой волны от стены, а также между данной точкой и фотоприемником обозначены переменными  $d_1$  и  $d_2$ . Углы освещенности к точке отражения и фотоприемнику представлены величинами  $\alpha_{ir}$  и  $\beta_{ir}$ . Принимаемая мощность  $P_r$  рассчитывается с учетом отражения светового потока от стены, используя коэффициент усиления канала постоянного тока на прямом пути  $H_d(0)$  и отраженном пути  $H_{ref}(0)$ . Согласно [6–9], общая полученная мощность в сценарии с многолучевым распространением определяется следующим образом:

$$P_r = \sum_{N_{LED}} \left\{ P_t H_d(0) + \int_{reflections} P_t D H_{ref}(0) \right\}, \quad (1)$$

где  $P_t$  – это передаваемая оптическая мощность, которая согласно [6] определяется как:

$$P_t = \int_{\Lambda_{min}}^{\Lambda_{max}} \int_0^{2\pi} \Phi_e d\theta d\lambda, \quad (2)$$

где  $\Lambda_{min}$  и  $\Lambda_{max}$  определяются кривой чувствительности фотодиода.  $\Phi_e$  – это энергия потока, которая определяется как:

$$\Phi_e = K_m \int_{380}^{780} V(\lambda) \Phi_e(\lambda) d\lambda, \quad (3)$$

где  $V(\lambda)$  – стандартная кривая яркости,  $K_m$  – коэффициент максимальной видимости, определенный как 683 лм/Вт при  $\lambda = 555$  нм.

Коэффициент усиления канала по постоянному току на прямом пути распространения определяется согласно [10, 11] как:

$$H(0) = \begin{cases} \frac{A_r(m_l + 1)}{2\pi d^2} \cos^{m_l}(\phi_r) T_s(\psi) g(\psi) \cos(\psi_r) & 0 \leq \psi_r \leq \psi_c \\ 0 & \psi_r > \psi_c \end{cases}, \quad (4)$$

где  $T_s(\psi)$  – усиление оптического фильтра,  $g(\psi)$  – усиление оптического концентратора,  $A_r$  – физическая площадь детектора в фотодиоде,  $d$  – расстояние между светодиодом и фотодиодом. Ширина поля зрения фотодиода определяется константой  $\psi_c$ . Выражение для оптического концентратора  $g(\psi)$  согласно [10] имеет следующий вид:

$$g(\psi) = \begin{cases} \frac{n^2}{\sin^2 \psi_c}, & 0 \leq \psi_r \leq \psi_c \\ 0, & 0 \geq \psi_c \end{cases}, \quad (5)$$

где  $n$  – показатель преломления.

Коэффициент усиления канала по постоянному току при отражении светового потока от стены определяется согласно [11] как:

$$dH_{ref}(0) = \begin{cases} \frac{(m_l + 1)A_r}{2(\pi d_1 d_2)^2} \rho dA_{wall} \cos^{m_l}(\phi_r) \cos(\beta_{ir}) T_s(\psi) g(\psi_r) \cos(\psi_r) & 0 \leq \psi_r \leq \psi_c \\ 0 & \psi > \psi_c \end{cases}, \quad (6)$$

где  $\rho$  – коэффициент отражения, а  $dA_{wall}$  – это отражающая площадь фрагмента.

Критически важным требованием к производительности системы является среднеквадратичное распределение задержек, которое определяется, согласно [7], как:

$$D_{RMS} = \sqrt{\mu^2 - (\mu)^2}, \quad (7)$$

где  $\mu$  – это средняя избыточная задержка, которая определяется как:

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^M P_{d,i} t_{d,i} + \sum_{j=1}^N P_{ref,j} t_{ref,j}}{P_{rT}}, \quad (8)$$

где полученная оптическая мощность от  $i$ -го прямого пути –  $P_{d,i}$ , а от  $j$ -го отраженного пути –  $P_{ref,j}$ . Термины  $M$  и  $N$  являются числом прямых путей от источника светодиода к определенному фотодетектору и числом отраженных путей к тому же фотодетектору.

Значение  $\mu^2$  задается как:

$$\mu^2 = \frac{\sum_{i=1}^M P_{d,i} t_{d,i}^2 + \sum_{j=1}^N P_{ref,j} t_{ref,j}^2}{P_{rT}}. \quad (9)$$

Максимальная скорость битового потока, которую можно передать через канал без необходимости использования эквалайзера, выражается согласно [12] как:

$$R_b \leq \frac{1}{10D_{RMS}} \tag{10}$$

В данной модели предполагается, что светодиод обладает Ламбертовым характером излучения. Таким образом, интенсивность излучения зависит от угла облучения  $\phi$ . Величина  $m_l$  представляет собой порядок Ламбертова излучения и выражается полууглом при половинной освещенности светодиода  $\phi_{1/2}$ . Порядок Ламбертова излучения определяется как:

$$m_l = \frac{-\ln(2)}{\ln(\cos \phi_{1/2})} \tag{11}$$

Программное обеспечение OptiSystem обеспечивает среду с визуализацией и инструментами анализа, которые могут эффективно имитировать и анализировать поведение систем СВС.

Размер помещения для моделирования системы имеет размеры до 10 м в длину, ширину и высоту.

На основе анализа информации из источников [13–14] определены значения по умолчанию для углов падения  $\theta_d$ , углов излучения  $\theta_s$  и расстояния между передатчиком и приемником  $l$ , характерные для моделирования систем в общем случае, которые задаются следующим образом:

$$l = 10\text{ м} = \{ \theta_s = 22^\circ, \theta_d = 25^\circ \} \tag{12}$$

На рис. 1 и 2 представлены схемы имитационной модели в среде «OptiSystem» с одним и двумя светодиодами соответственно. Источник сообщений (информации) генерирует псевдослучайную последовательность данных с заданным в процессе моделирования битрейтом (по умолчанию  $2,5 \cdot 10^9$  бит/с). Сгенерированные данные преобразуются в электрические импульсы без возвращения к нулю (NRZ), и эти сигналы напрямую управляют светодиодом. Связь между передатчиком и приемником осуществляется через диффузный канал.

Модель учитывает точки отражения сигнала от различных поверхностей помещения, в котором производилось моделирование. Как показано на схеме модели применяется ослабление на 5 дБ в точке отражения. В модели использованы разделители мощности на передающей стороне, а также оптический аттенуатор и сумматор мощности на стороне приемника, прежде чем подавать его на фотодиод. При моделировании используется фильтр нижних частот для фильтрации обнаруженного электрического сигнала от фотодиода. Отфильтрованный сигнал регенерируется с использованием компонента 3R-регенератора, который анализирует частоту ошибок по битам (Bit Error Rate, BER) и Q-фактор в анализаторе. Для проверки формы входных и выходных сигналов на передающей и приемной сторонах используется осциллограф.

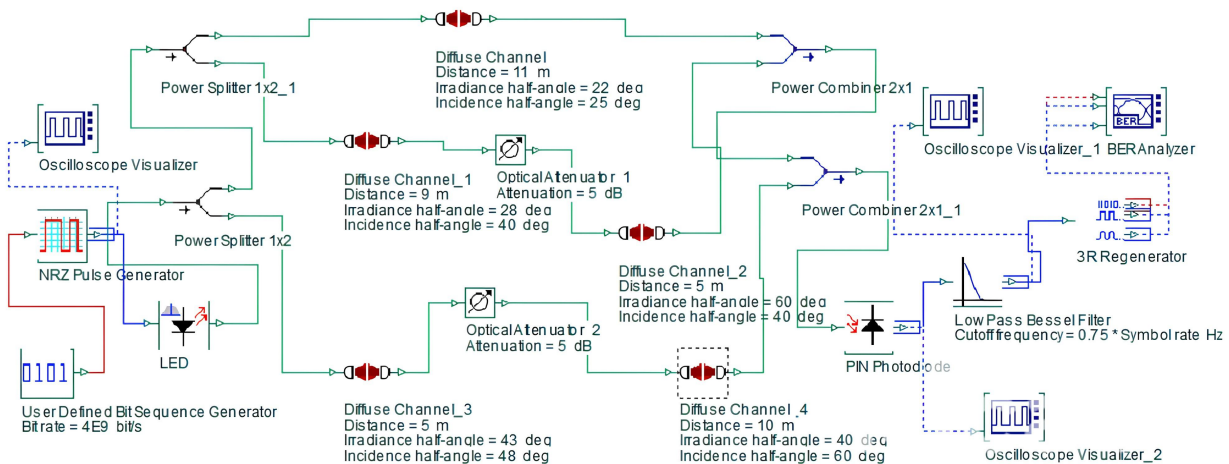


Рис. 1. Схема имитационной модели системы в «OptiSystem» для NLOS системы с одним светодиодом

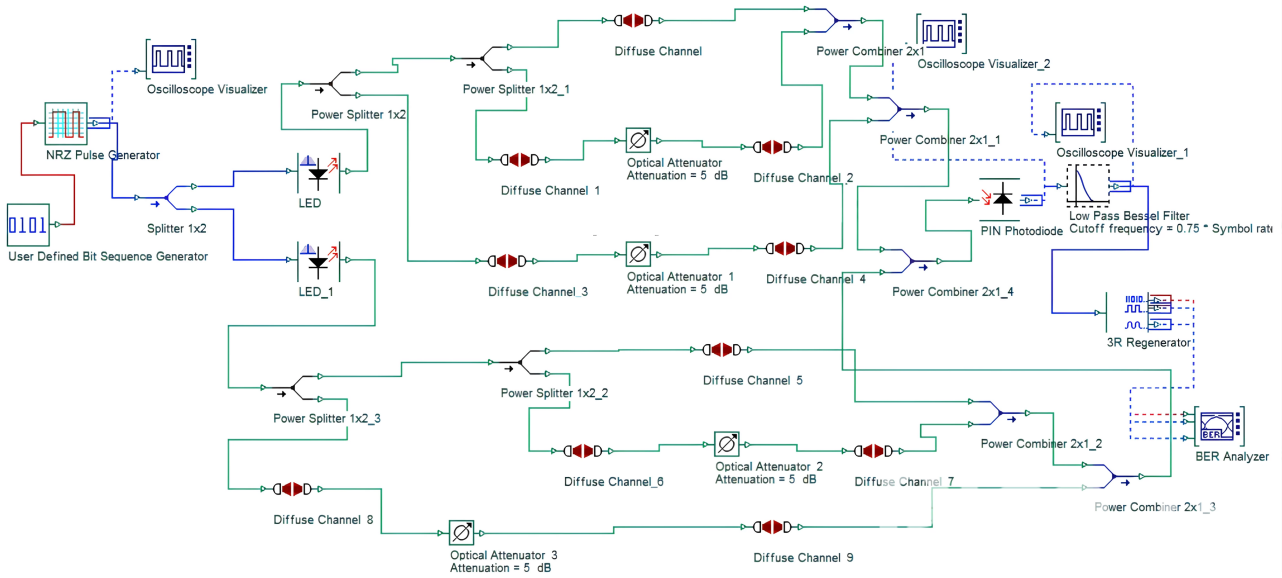


Рис. 2. Схема имитационной модели системы в «OptiSystem» для NLOS системы с двумя светодиодами

В аппаратуре оптических систем, например, измерение коэффициента ошибок необходимо производить в каждом оптическом канале, что занимает много времени. Для сокращения времени контроля канала без перерыва передачи информации используется метод на основе оценки Q-фактора (Quality – качество), который представляет собой отношение:

$$Q = \frac{|\mu_1 - \mu_0|}{\sigma_1 - \sigma_0}, \tag{13}$$

где  $\mu_1$  и  $\mu_0$  графическая зависимость значения сигнала («1» и «0») и дисперсии шума  $\sigma_1$  и  $\sigma_0$  относительно уровня принятия решения о передаче логической «1» или «0».

Между Q-фактором и коэффициентом битовых ошибок установлена однозначная связь:

$$K_{ош}(Q) = BER(Q) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left[ \frac{\exp(Q^2/2)}{Q} \right]. \tag{14}$$

Моделирование проводится с разными типами источников: LED-светодиода и лазерного светодиода (Laser), для сравнения характеристик при использовании разных типов источников. Оба типа имеют длину волны излучения 590 нм, так как данное значение лежит в середине диапазона 450–750 нм длин волн, охватываемых современными светодиодами диодами.

Полный набор параметров модели представлен в табл. 1.

Таблица 1

**Параметры для моделирования NLOS системы**

Параметр	Значения
Тип источника	LED
Длина волны	590 нм
Мощность излучение	[5, 55, 100] мВт
Расстояние излучатель-фотоприемник	От 1 до 10 с шагом 1 м
Скорость передачи	[19200, 38400, 57600, 115200] бит\с, [1, 2, 5, 10, 25, 50, 100] Мбит\с
Полуугол излучения	[5, 15, 25, 35, 45]°

**Анализ результатов моделирования.** При проведении экспериментальных исследований систем СВС выбор расстояния в 10 метров между источником и приемником имеет важное значение.



Это расстояние выбрано, так как оно эффективно перекрывает средний размер большинства жилых и коммерческих помещений, таких как офисы, учебные классы и жилые помещения. Оно также актуально как для конфигурации установки потолок-пол, так и для варианта стена-стена, что делает результаты исследований максимально применимыми и репрезентативными.

Использование такого расстояния позволяет оценить производительность и надежность системы СВС в реалистичных условиях. Более того это расстояние позволяет учесть возможные потери сигнала и его искажения, которые могут возникнуть из-за особенностей помещений и различных препятствий.

График изменения показателя Q-фактор в зависимости от угла излучения при различных скоростях передачи для варианта ненаправленной модели с одним светодиодом представлен на рис. 3.

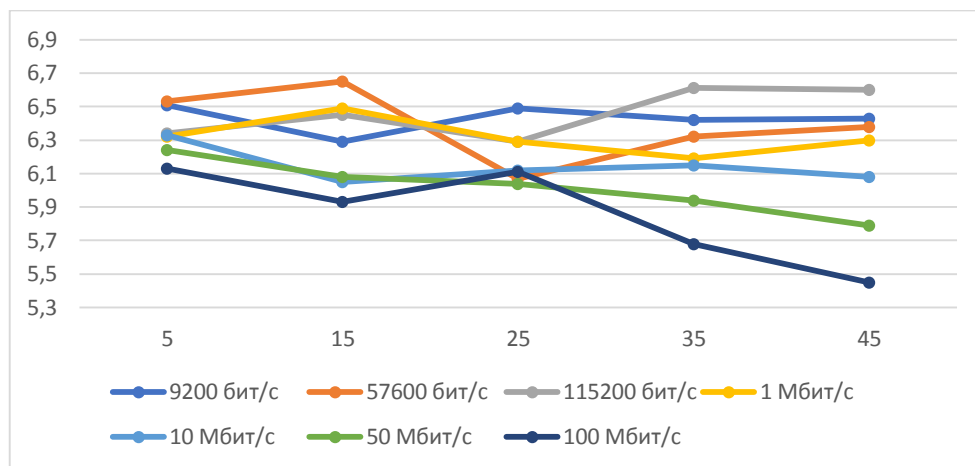


Рис. 3. График изменения показателя Q-фактор для варианта ненаправленной модели с одним светодиодом

Из представленной графической интерпретации видно, что Q-фактор для светодиодов зависит от скорости передачи и угла излучения различным образом.

Для светодиода Q-фактор остается относительно стабильным вне зависимости от увеличения угла излучения. Это свидетельствует о том, что качество сигнала, передаваемого через светодиод, существенно не ухудшается даже при увеличении угла излучения. Значения Q-фактора колеблются с небольшим разбросом от 5,45 до 6,51 при увеличении скорости передачи от 9200 бит/с до 100 Мбит/с. Такая минимальная изменчивость Q-фактора указывает на хорошее поддержание сигнала при разных углах излучения, что делает светодиод подходящим выбором для систем ненаправленного действия с использованием отраженных каналов, где основное внимание уделяется стабильности передачи.

Таким образом, целесообразное использование одного светодиода для ненаправленной системы передачи данных имеет силу, если требуется высокая стабильность сигнала на малых расстояниях до 10 м при различных углах излучения и скорости передачи до 100 Мбит/с.

Результаты изменения показателя Q-фактора в зависимости от угла излучения при различных скоростях передачи для варианта ненаправленной модели с двумя светодиодами представлена на рис. 4.

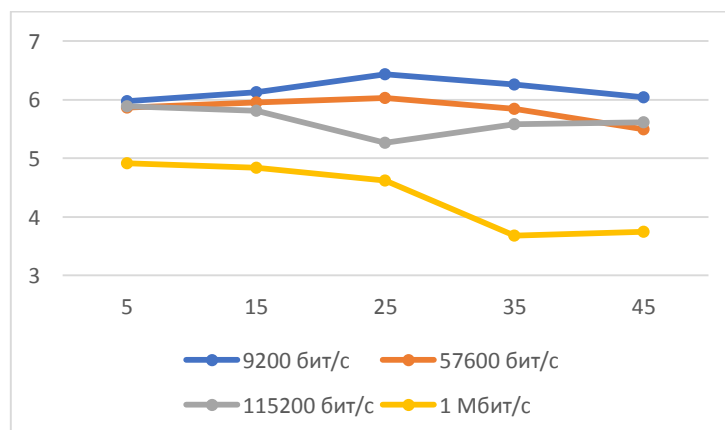


Рис. 4. График изменения показателя Q-фактор для варианта ненаправленной модели с двумя светодиодами

Из представленной таблицы и графической интерпретации видно, что также как и для системы ненаправленного действия с одним светодиодом так и для системы с двумя  $Q$ -фактор зависит от скорости передачи и угла излучения различным образом.

В сравнении с предыдущим моделированием системы ненаправленного действия с одним светодиодом, где качественные показатели были стабильны, данная модель с двумя светодиодами находится в зависимости от скорости передачи и угла излучения. С увеличением скорости передачи и угла излучения ее качество и количество правильно принятых битов снижается. Из проделанного моделирования можно сделать вывод: в системах ненаправленного действия с увеличением количества светодиодов повышается вероятность межсимвольной интерференции, что ведет к зависимости от скорости передачи.

**Заключение.** Для ненаправленных систем с двумя светодиодами с увеличением скорости передачи и угла излучения ее качество и количество правильно принятых битов снижается. Поэтому можно сделать вывод, что в системах ненаправленного действия с увеличением количества светодиодов повышается вероятность межсимвольной интерференции, что ведет к зависимости от скорости передачи. Таким образом, моделирование систем является существенным инструментом, способствующим принятию обоснованных решений в сфере беспроводной оптической связи и созданию оптимальной и эффективной среды с использованием данной технологии.

*Источник финансирования: статья написана в рамках выполнения научно-исследовательской работы «Беспроводная система передачи данных для обеспечения безопасной связи устройств Интернета вещей на основе технологии Li-Fi» задания «Современные беспроводные системы передачи данных» в составе ГПНИ «Цифровые и космические технологии, безопасность человека, общества и государства 1.5.6» подпрограммы 5.1 «Цифровые технологии и космическая информатика» на 2021–2025 годы.*

## RESEARCH OF THE ATMOSPHERIC DATA CHANNEL INDIRECT VISIBILITY

S. PALAVENIA, A. SALAUYOU, A. KARNEYEVA

### Abstract

A model of a communication channel using visible light is considered. The results of modeling a simulation model of a communication system with visible light in an indirect visibility channel are presented.

### Список литературы

1. Yung, H. Visible light communication systems supporting wireless data access and indoor positioning applications: Databook / H. Yung // Nanyang Technological University, 2020. – 220 с.
2. Komine, T. Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights / T. Komine, M. Nakagawa // IEEE, 2004. – С. 100–107.
3. Amirshahi, P. Broadband access over medium and low voltage power-lines and use of white light emitting diodes for indoor communications / P. Amirshahi, M. Kavehrad // IEEE, 2006. – С. 897–901.
4. O'Brien, D. Indoor visible light communications: challenges and prospects / D. O'Brien [et al.] // San Diego, 2008. – С. 60–68.
5. Nguyen, H. Q. A MATLAB-based simulation program for indoor visible light communication system / H. Q. Nguyen [et al.] // 7th International Symposium on Communication Systems, 2010. – С. 153–157.
6. He, Y. Real-time Audio & Video Transmission System Based on Visible Light Communication / Y. He [et al.] // Optics and Photonics Journal, 2010. – С. 537–541.
7. Lou, P. Fundamental analysis for indoor visible light positioning system / P. Lou [et al.] // 1st IEEE International Conference on Communications in China Workshops, 2012. – С. 59–63.
8. Yoneda, R. A tight curve warning system using FSK visible light and road-to-vehicle communication / R. Yoneda, K. Okuda, W. Uemura // IEEE Third International Conference on Consumer Electronics, Berlin, – 2013. – С. 1–3.

9. Premachandra, H. C. N. High-speed-camera image processing-based LED traffic light detection for road-to-vehicle visible light communication / H. C. N. Premachandra [et al.] // IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 2010. – С. 793–798.
10. Lee, S. J. Simulation modeling of visible light communication channel for automotive applications / S. J. Lee [et al.] // 15th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, 2012. – С. 463–468.
11. Kim, B. W. Vehicle Positioning Scheme Using V2V and V2I Visible Light Communications / B. W. Kim, S. Y. Jung // IEEE 83rd Vehicular Technology Conference, 2012. – С. 1–5.
12. Parikh, H. Wirelessly transmitting a grayscale image using visible light / H. Parikh [et al.] // International Conference on Advances in Technology and Engineering, 2013. – С. 1–6.
13. Mousa, F. Investigation of data encryption impact on broadcasting visible light communications / F. Mousa [et al.] // 9th International Symposium on Communication Systems, Networks & Digital Sign, Manchester, 2014. – С. 390–394.
14. Visible light communication: Databook [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [https://www.researchgate.net/publication/323596448\\_VISIBLE\\_LIGHT\\_COMMUNICATION](https://www.researchgate.net/publication/323596448_VISIBLE_LIGHT_COMMUNICATION). – Дата доступа : 11.10. 2024.
15. Implementation of Visible Light communications For Indoor Applications [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1263928/FULLTEXT02.pdf>. – Дата доступа : 05.11. 2024.

DOI: 10.61726/6890.2024.66.94.001

УДК 654.078

## АНАЛИЗ МЕТОДОВ ЮСТИРОВКИ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

О.Р. ХОДАСЕВИЧ<sup>1</sup>, О.П. РЯБЫЧИНА<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Учреждение образования «Белорусская государственная академия связи»,  
ул. Ф. Скорины, 8/2, Минск, 220076, Беларусь  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9696-3685>

<sup>2</sup> Учреждение образования «Белорусская государственная академия связи»,  
ул. Ф. Скорины, 8/2, Минск, 220076, Беларусь  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6869-1990>

Поступила в редакцию 2 июля 2024

Представлены результаты анализа методов юстировки оптического волокна перед его сварным соединением. Рассмотрены способы реализации этих методов в различных приборах для сварки оптоволокна. Приведены результаты исследования затухания оптического сигнала в месте соединения оптических волокон для наиболее распространенных типов сварочных аппаратов. Предложены рекомендации по использованию сварочных аппаратов оптоволокна для монтажа линии передачи оптического сигнала при решении различных прикладных задач.

*Ключевые слова:* оптическое волокно, юстировка, затухание оптического сигнала, эксцентриситет, ошибка концентричности сердцевин, профиль показателя преломления.

**Введение.** В настоящее время волоконно-оптические технологии находят все большее применение в самых различных системах [1, 2]. При этом на качество работы таких систем во многом влияют условия передачи оптического сигнала по оптоволокну, наиболее критичным из которых является его затухание. Критических значений затухание в линии связи может достигать при неточном соединении оптических волокон: при их механическом соединении или при их сварке. Поскольку сварное соединение сегодня является преобладающим, то выбор соответствующего сварочного оборудования при монтаже волоконно-оптической линии для решения конкретных задач имеет важное значение.

Несмотря на то, что использование оптических световодов в качестве направляющих систем для передачи сигналов было предложено еще в 30-е годы XX века, первое коммерческое производство оптических волокон для использования на линиях связи было начато компанией Corning только в 1970 году, что в немалой степени было связано с отсутствием соответствующих технологий. Первые оптические волокна имели диаметр сердцевин (по которой в основном распространяется оптический сигнал) 50–62 мкм и диаметр оболочки 125 мкм. Таким образом, диаметр сердцевин составлял почти половину диаметра оптоволокна, и поэтому процесс соединения двух оптических волокон не вызывал особых проблем – свет из одного волокна переходил в другое без существенных потерь, особенно в сравнении с затуханием оптического сигнала в самом оптоволокне, составлявшим в то время 7–14 дБ/км. Такое оптоволокно являлось многомодовым и для некоторых применений сохранилось до сих пор. Однако для увеличения дальности и скорости передачи данных было разработано так называемое одномодовое оптическое волокно с диаметром сердцевин 8–10 мкм (при сохранении диаметра оболочки 125 мкм). При этом из-за сложности технологических процессов возникла проблема точного расположения сердцевин по центру световода. В идеале поперечное сечение оптоволокна является практически круглым с сердцевиной в точности по центру, однако в реальности это не так. Само оптоволокно может иметь эллиптичность, его диаметр (и диаметр сердцевин) может быть неравномерным, микроусловия техпроцесса могут изменяться – в результате чего сердцевина может располагаться не точно по центру. Это отклонение получило название «core to cladding concentricity error» (СССЕ) или ошибка концентричности сердцевин и оболочки оптоволокна (рис. 1). В различной литературе этот параметр часто называют эксцентриситетом [3, 4].

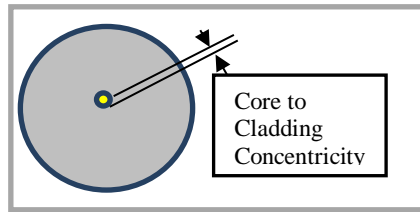


Рис. 1. Ошибка concentricity сердцевин и оболочки оптоволокна

В результате при соединении двух оптических волокон их сердцевин «не стыкуются» друг с другом (рис. 2). Поскольку, как было указано выше, именно по сердцевине в основном передается информационный сигнал, то вследствие расхождения сердцевин в месте соединения оптических волокон часть оптического излучения не переходит из одного световода в другой, а попадает в оболочку и затухает либо уходит в окружающее пространство. В связи с этим в месте стыка оптических волокон может происходить существенная потеря мощности информационного сигнала, приводящая к различным негативным последствиям, вплоть до неработоспособности волоконно-оптической системы.

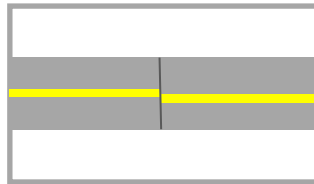


Рис. 2. Расхождение сердцевин оптических волокон в месте соединения из-за эксцентриситета

Для сведения к минимуму этого эффекта Международным союзом электросвязи были разработаны и введены нормы для соответствующих производителей на геометрические параметры оптического волокна [5], основные из которых представлены в табл. Однако, несмотря на это, значение СССЕ в той или иной мере присутствует практически всегда, а при несоблюдении технологических процессов изготовления оптоволокна может достигать критических значений. Поэтому, с целью сведения потерь сигнала от расхождения сердцевин оптических волокон в месте соединения из-за эксцентриситета к минимуму были разработаны методы юстировки оптических волокон перед их соединением.

Таблица

Параметры одномодового волокна согласно рекомендации G.652

Атрибуты волокна			
Атрибут	Подробность	Значение	Единицы
Диаметр модового поля	длина волны	1310	нм
	диапазон номинальных значений	8,6–9,5	мкм
	допуск	±0,6	мкм
Диаметр оболочки	номинал	125	мкм
	допуск	±1	мкм
Погрешность concentricity сердцевин	максимальное значение	0,6	мкм
Некруглость оболочки	максимальное значение	1,0	%

**Основная часть.** Основной задачей юстировки (выравнивания) оптических волокон перед соединением является максимальное совмещение их сердцевин с целью минимизации потерь информационного сигнала при переходе из одного оптоволокна в другое. Сегодня используются четыре основных метода юстировки:

- метод юстировки по V-образной канавке;
- метод юстировки по максимальному уровню мощности сигнала (метод LID);
- метод юстировки по профилю показателя преломления (метод PAS);
- методы юстировки по тепловизионным изображениям (методы CDS и RTC).

При механическом соединении оптических волокон могут использоваться два первых метода юстировки (причем второй со значительными ограничениями). При соединении с помощью сварочных аппаратов – все четыре метода.

*Метод юстировки по V-образной канавке.* Данный метод является наиболее простым в реализации и использовании. Он был разработан в 1977 году компанией Fujikura и производит выравнивание оптических волокон только по их оболочке. Суть метода состоит в том, что два оптоволоконна укладываются в расположенные друг напротив друга и точно выровненные V-образные канавки и фиксируются специальными зажимами (рис. 3).

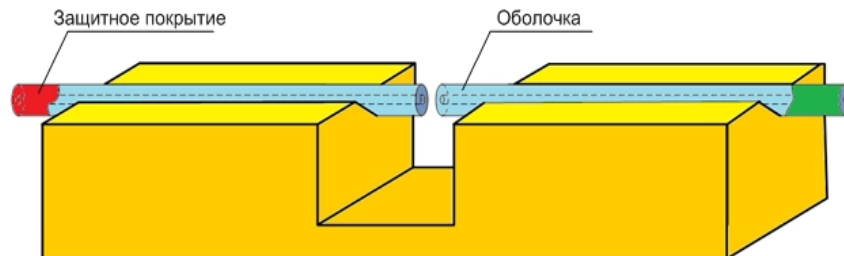


Рис. 3. Метод юстировки по V-образной канавке

Поскольку канавки друг относительно друга четко выровнены, то два оптоволоконна также оказываются на одном уровне, после чего их необходимо соединить в продольной плоскости либо механически, либо с помощью сварки. Такой способ реализуется в механических соединителях оптоволоконна или в простейших сварочных аппаратах. Он прост в реализации, однако не гарантирует высокого качества соединения, поскольку канавки выравнивают оптические волокна по оболочке, что не гарантирует точного совпадения их сердцевин. Поэтому, во-первых, метод подходит только для современных оптических волокон, изготовленных в соответствии с требованиями международных организаций (например, МСЭ, табл.). При этом потери на сварном соединении даже для таких волокон составляют в среднем 0,05 дБ. При соединении старых или некачественных волокон достичь приемлемых показателей потерь мощности сигнала будет трудно, если вообще возможно. Во-вторых, метод критичен к внешним факторам – волокна не будут лежать ровно, если в V-образную канавку попадет микроредмет (ворсинка или частичка чего-либо, гидрофоб и т. д.).

Модификацией данного способа юстировки является использование активной V-образной канавки. Сварочные аппараты, использующие данный способ выравнивания имеют 4 мотора (в моделях с пассивной V-образной канавкой их всего 2), что позволяет перемещать волокна в двух плоскостях (продольной и вертикальной) и лучше выравнивать волокна даже при наличии небольших загрязнений V-образной канавки и держателей волокна.

*Метод юстировки по максимальному уровню мощности сигнала.* Метод LID (Local Injection and Detection) был разработан компанией Siemens в 1984 году и использует сведение волокон не по оболочке или сердцевине, а по максимальному уровню мощности сигнала, что, в принципе, подразумевает максимальное совмещение сердцевин оптических волокон. Метод основан на вводе излучения в одно оптоволоконно и его последующее детектирование во втором (рис. 4). Метод при определенных условиях может использоваться при механическом соединении оптических волокон, но связан с определенными трудностями с организацией ввода и детектирования тестового сигнала. Поэтому, как правило, такая юстировка применяется в сварочных аппаратах.



Рис. 4. Метод юстировки по максимальному уровню мощности сигнала

Волокна, которые укладываются в сварочный аппарат, незначительно изгибаются, что позволяет вводить и выводить из них тестовый оптический сигнал от встроенного источника света. На

изгибе первого оптоволоконного сигнала вводится, на изгибе второго оптоволоконного часть введенного сигнала выводится и попадает в детектор мощности. Сварочный аппарат сводит оптические волокна в трех плоскостях таким образом, чтобы на выходе получить сигнал максимальной мощности. Причем юстировка продолжается даже в процессе сварки, что позволяет достичь минимальных, вплоть до 0 дБ, потерь на сварном соединении. Однако необходимо учитывать, что минимальные потери в таком случае обеспечиваются только при проведении измерений в одну сторону – от источника света к детектору. В обратном направлении потери на соединении могут отличаться.

Сварочные аппараты, реализующие такой метод юстировки, относительно дороги и не получили широкого распространения. Кроме того, LID система юстировки имеет ряд недостатков: высокие требования к качеству скола, сложность ввода/вывода излучения через оболочку оптоволоконного, трудности с оптоволоконным, имеющим сложный профиль показателя преломления (в этом случае метод LID в сварочных аппаратах чаще всего комбинируется с другими методами юстировки).

*Метод юстировки по профилю показателя преломления.* Метод PAS (Profile Aligning System) можно отнести к третьему поколению методов юстировки. Данный метод относится к классу методов выравнивания по сердцевине. Он был разработан компанией Fujikura в 1985 году и на сегодняшний день является самым распространенным в силу своей надежности и относительной простоты работы.

Основной задачей устройства является точное определение сердцевины оптического волокна. Метод PAS использует законы геометрической оптики. По сути, оптоволоконное представляет собой стеклянный цилиндр, который можно представить как двояковыпуклую линзу. Если расположить источник света перпендикулярно оптоволоконному, то его лучи, проходя через такую «линзу», будут фокусироваться в некой точке. Поскольку показатель преломления оболочки и сердцевины оптоволоконного разный, то свет, проходя через оболочку и сердцевину, будет преломляться по-разному, т. е. мы имеем две «линзы» с разными фокусными расстояниями. Далее с помощью системы фотоприемников можно получить некоторую картину распределения интенсивности света в пространстве, формируемую преломленными лучами. Цифровые алгоритмы обработки информации позволяют четко выделить область сердцевины оптоволоконного, где интенсивность света будет больше, и область оболочки, где интенсивность света будет меньше. После обнаружения сердцевины оптических волокон двигатели сварочного аппарата под управлением микроконтроллера совмещают их и далее волокна сплавляются посредством высоковольтной дуги.

Несмотря на простоту и эффективность метод PAS имеет определенные недостатки. Во-первых, оценка потерь после сварки получается менее достоверной, чем при методе LID. Во-вторых, при методе PAS нет возможности продолжать юстировку волокон в процессе их сплавления, что несколько снизит точность итогового результата.

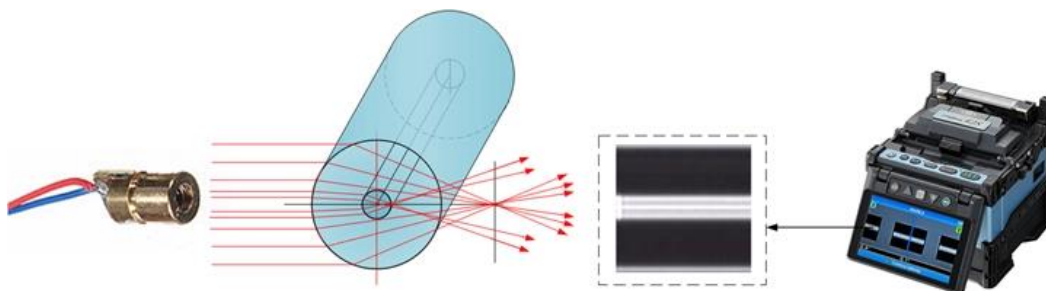


Рис. 5. Метод юстировки по профилю показателя преломления

Снижение точности совмещения сердцевины оптических волокон после их сварки обусловлено эффектом поверхностного натяжения расплавленного стекла при его нагреве/охлаждении. Во время действия разряда дуги силы поверхностного натяжения пытаются выровнять края оболочек волокон, а сердцевины в это время расходятся. Для решения этой проблемы для сварочных аппаратов с юстировкой по сердцевине предусмотрен специальный режим, который оценивает величину «ступеньки», образующейся при смещении оптических волокон при выравнивании их сердцевины (рис. 6, а). Если «ступенька» велика, то аппарат дополнительно сдвигает волокна на величину, необходимую для нейтрализации эффекта поверхностного натяжения (рис. 6, б). Когда оптические волокна плавятся, сила поверхностного натяжения частично смещает оболочки назад и сердцевины выравниваются (рис. 6, в). Поскольку идеальный дополнительный сдвиг рассчитать практически невозможно, потери все равно неизбежны, но они значительно ниже, чем при обычной сварке.

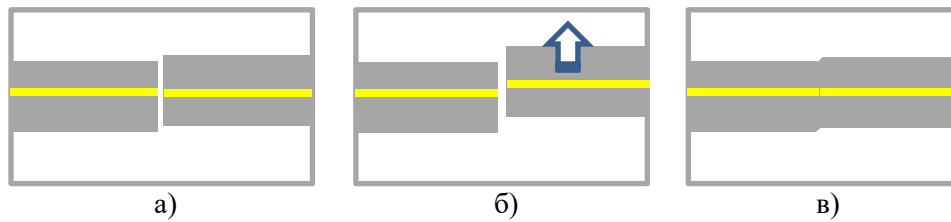


Рис. 6. Юстировка с предварительным сдвигом

Режим юстировки с предварительным сдвигом имеют практически все современные сварочные аппараты, использующие юстировку по сердцевине, хотя каждый производитель называет его по-разному, например, у сварочных аппаратов Sumitomo специальный режим выравнивания называется IAS, у Fujikura данный режим носит название ECF и т. д.

*Методы юстировки по тепловизионным изображениям.* Методы юстировки оптоволокон по тепловизионным изображениям предполагают управление процессом сварки на основе данных, полученных по результатам анализа тепловых изображений места стыка, и относятся к классу методов выравнивания по сердцевине.

Метод CDS (Core Detection System) – метод юстировки, основанный на различиях люминесцентных характеристик сердцевины и оболочки оптического волокна. При помощи предварительного дугового разряда между электродами сварочный аппарат разогревает оптическое волокно до состояния, когда оно начинает светиться. Поскольку в сердцевине присутствует ряд примесей, она светится ярче, чем оболочка. По разности контраста микроконтроллер сварочного аппарата определяет геометрию сердцевины и оболочки оптического волокна и совмещает сердцевины свариваемых волокон по трем осям, учитывая при этом влияние поверхностного натяжения (рис. 7). Затем происходит процесс сварки, причем если смещение сердцевины лежит в заданных пределах, а диаметры модовых пятен равны, то на этом сварка завершается. В противном случае волокна вновь разогреваются, и вносится очередная поправка. Несмотря на сложность процесса, юстировка волокон этим методом отличается высокой скоростью.

Метод RTC основан на юстировке волокон способом CDS, но использует более глубокий анализ теплового излучения. При высоких температурах, кроме теплового излучения, возникает излучение на определенных длинах волн, обусловленное переходами возбужденных электронов примесей кварцевого стекла на другой энергетический уровень. Так как оболочка и сердцевина имеют различный химический состав, то их спектры излучения будут различаться. С помощью специальных фильтров выделяют узкую спектральную область, в которой доминирует излучение, обусловленное примесями сердцевины световода.



Рис. 7. Схема регистрации тепловых изображений

Отличительной особенностью метода RTC является возможность выполнения юстировки сердцевины световодов в процессе сварки, что позволяет корректировать взаимное расположение волокон до момента застывания стекла. Считается, что метод тепловых изображений позволяет получить самое лучшее качество сварных соединений. По тепловым фотографиям, кроме того, можно получить дополнительную информацию: профиль показателя преломления, градиент деформации сердцевины, диаметр модового пятна, тип оптического волокна (отличить, например, эрбиевое волокно от волокна со смещенной дисперсией).

Недостатком данного метода является зависимость результатов от спектра излучения примесей, а соответственно от химического состава сердцевины. Поэтому сварочные аппараты, использующие метод RTC, могут работать только с определенными типами оптических волокон,



предусмотренных конструкцией прибора (к устройству прилагаются различные наборы спектральных фильтров). Также сварочные аппараты с использованием юстировки по тепловизионным изображениям отличаются высокой ценой и сложностью сервисного обслуживания.

**Заключение.** Сварочные приборы с юстировкой по V-образной канавке допустимо применять, когда к сварному соединению не предъявляют высоких требований по вносимым потерям. К таким случаям относятся сети связи небольшой протяженности, сети доступа, пассивные оптические сети, локальные компьютерные сети, структурированные кабельные системы зданий и т. д.

Наибольшее распространение получили сварочные аппараты, использующие юстировку по сердцевине с режимом предварительного сдвига. Однако практические опыты по соединению оптических волокон (путем совмещения их по сердцевине) показали, что затухание на месте соединения имеет в основном значение в пределах 0,01–0,05 дБ, редко до 0,1 дБ. Причем чем меньше «ступенька» основного смещения оптических волокон, тем больше может оказаться затухание. То есть при малом значении СССЕ режим дополнительного сдвига может наоборот привести к ухудшению результата сварки оптоволокна [6]. Отсюда можно сделать вывод: при сварке оптических волокон (кабелей) известных производителей, изготовленных в течение последних 10–15 лет, с заявленным низким эксцентриситетом ( $СССЕ < 0,05$  мкм) режим предварительного сдвига включать не нужно. Он необходим только если параметры затухания сигнала на соединении, полученном при обычном режиме сварки, не будут удовлетворять необходимым значениям.

Наконец, аппараты с использованием юстировки по тепловизионным изображениям, как правило, используются в лабораториях и исследовательских центрах, реже – для некоторых областей производства, когда от результатов соединения оптических волокон требуются расширенные возможности, например, для работы с оптическим волокном большого диаметра, с фотонно-кристаллическими волокнами, с волокнами, сохраняющими состояние поляризации, а также при изготовлении элементов эрбиевых волоконно-оптических усилителей.

## ANALYSIS OF OPTICAL FIBER ALIGNMENT METHODS

O.R. KHODASEVITCH, O.P. RYABYCHINA

### Abstract

The results of an analysis of methods for adjusting optical fiber before its welding are presented. The ways for implementing these methods in various devices for optical fibers splicing are considered. The results of an investigation of the optical signal attenuation at the junction of optical fibers are presented for the most common types of splicing machines. Recommendations for the use of fiber optic splicers for installing an optical signal transmission line are offered for various situations.

### Список литературы

1. Ходасевич, О. Р. Анализ направлений цифровой трансформации отрасли телекоммуникаций / О. Р. Ходасевич, О. П. Рябычина, Н. Е. Пацей // Проблемы инфокоммуникаций. – 2022. – № 2 (16). – С. 59–64.
2. Зеневич, А. О. Идентификация жидкостей и определение концентрации водных растворов при помощи оптического волокна / А. О. Зеневич [и др.] // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2023. – Т. 66, № 10. – С. 869–875.
3. Оптическое волокно // Портал Циклопедия [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [https://cyclowiki.org/wiki/%D0%9E%D0%BF%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%B5\\_%D0%B2%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%BA%D0%BD%D0%BE](https://cyclowiki.org/wiki/%D0%9E%D0%BF%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%B5_%D0%B2%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%BA%D0%BD%D0%BE). – Дата доступа : 31.08.2023.
4. ArcTest, PAS и HDCM в процессе сварки волокон // Интернет портал [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [https://fibertool.ru/news/obzory\\_oborudovaniya/arctest/](https://fibertool.ru/news/obzory_oborudovaniya/arctest/). – Дата доступа : 30.08.2023.
5. Рекомендация МСЭ-Т G.652. Характеристики одномодового оптического волокна и кабеля // Международный союз электросвязи [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://izmer-ls.ru/g652.pdf/>. – Дата доступа : 30.08.2023.
6. Ходасевич, О. Р. Оптимизация потерь на сварном соединении оптического волокна / О. Р. Ходасевич // Современные средства связи : материалы XXVIII Междунар. науч.-техн. конф., 26–27 окт. 2023 года, Минск, Респ. Беларусь ; редкол. : А. О. Зеневич [и др.]. – Минск : Белорусская государственная академия связи, 2023. – С. 217–218.

DOI: 10.61726/5810.2024.39.20.001

УДК 621.39

## ПЕРСПЕКТИВЫ ВНЕДРЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ НА ОСНОВЕ СЕТЕЙ СВЯЗИ СТАНДАРТА 5G В ОТРАСЛЯХ ЭКОНОМИКИ

В.М. ИВАШКО<sup>1</sup>, Е.С. РОМАНОВА<sup>2</sup>, О.Г. ГЕЛИВЕР<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Учреждение образования «Белорусская государственная академия связи»,  
ул. Ф.Скорины, 8/2, Минск, 220076, Беларусь  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4702-6254>

<sup>2</sup>Учреждение образования «Белорусский государственный экономический университет»,  
пр. Партизанский 26, Минск, 220070, Беларусь  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7630-1000>

<sup>3</sup>Учреждение образования «Белорусская государственная академия связи»,  
ул. Ф.Скорины, 8/2, Минск, 220076, Беларусь  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6820-9163>

Поступила в редакцию 19 ноября 2024

В статье рассматриваются характеристики сети связи стандарта 5G, сценарии оказания услуг мобильной связи. Рассмотрены основные направления развития технологий на основе сетей связи 5G в отраслях экономики, определены условия и факторы, оказывающие влияние на внедрение технологий 5G в Республике Беларусь.

*Ключевые слова:* технологии 5G, точки роста экономики, технические характеристики технологии 5G, искусственный интеллект, Интернет вещей, виртуальная и дополненная реальность.

**Введение.** Влияние развития цифровой экономики на развитие общества и государства в современном мире приобретает глобальный масштаб. Ведущие страны мира работают над развитием технологий и внедрением цифровых предприятий, и уже сейчас очевидно, что сотовая подвижная электросвязь пятого поколения (5G) станет самой быстроразвивающейся технологией. Создаются новые сценарии, использующие ключевые преимущества технологий 5G: низкую задержку, высокую скорость и надежную защиту передаваемых данных при возможности подключения большого количества устройств.

Сегодня экспертами предлагается четыре типа перспективных сценариев использования технологии 5G, для которых необходимо подключение к сети с гарантированным временем передачи данных:

– медийные технологии в реальном времени – подключения, в которых время передачи данных играет ключевую роль. Они позволяют создавать индустриальные приложения и облачные игровые сервисы с использованием технологий дополненной и виртуальной реальности (AR/VR);

– управление устройствами на расстоянии – человек дистанционно управляет машинами и оборудованием, передвигающимися по земле и воздуху. Людям больше не придется работать в сложных климатических и опасных условиях, вместо этого они будут контролировать автономные устройства;

– промышленный контроль – функции мониторинга и контроля в режиме реального времени будут применяться для управления умными сетями, а для роботов станут доступны технологии машинного зрения;

– мобильная автоматизация – автоматизация цикла управления транспортными средствами и мобильными роботами обеспечит безопасное маневрирование множества дистанционно управляемых устройств на одной площадке [1].

Анализ зарубежных источников информации показывает, что многие страны активно внедряют технологии 5G. Представители бизнеса и население уже оценили преимущества этого вида

связи. Значительно опережают другие страны в развертывании 5G Китай и США: в общей сложности пятым поколением покрыто уже 652 города, из которых 356 приходится на Китай, 296 – на США. В пятерку лидеров по подключению стандарта 5G также вошли Филиппины (98 городов), Южная Корея (85 городов) и Канада (84 города). Замыкают топ-10 Испания, Италия, Германия, Великобритания и Саудовская Аравия. По итогам 2023 года общее количество используемых в мире 5G-устройств достигло 1,6 млрд. Для сравнения, в 2022 году этот показатель составлял приблизительно 1 млрд, зафиксировав рост в годовом исчислении на уровне 60 % [2].

Необходимо отметить, что развертывание сетей сотовой подвижной электросвязи пятого поколения в Республике Беларусь и внедрение на их базе технологических решений «умный дом» и «умный город» является одним из приоритетных направлений развития национальной информационно-коммуникационной инфраструктуры в 2021–2025 гг. Это предусмотрено государственной программой «Цифровое развитие Беларуси» на 2021–2025 годы, утвержденной постановлением Правительства от 2 февраля 2021 г. № 66.

В Республике Беларусь в настоящее время ведется работа по выработке подходов к внедрению технологий на основе сетей связи 5G в различных отраслях экономики. Результаты исследований в данном направлении показывают, что в различных отраслях экономики Республики Беларусь на основе сетей 5G также можно внедрять различные технологии, использование которых даст определенный экономический и социальный эффекты. При этом необходимо учитывать, что оттягивание принятия решения о внедрении технологий связи пятого поколения может привести к техническому отставанию отраслей экономики и потере рынков сбыта. В то же время существует ряд условий и факторов, оказывающих влияние на полномасштабное внедрение новых технологий связи, которые будут раскрыты в данной статье.

**Основная часть.** Развитие и внедрение технологии 5G за последние годы в мире представлено на рис. 1.

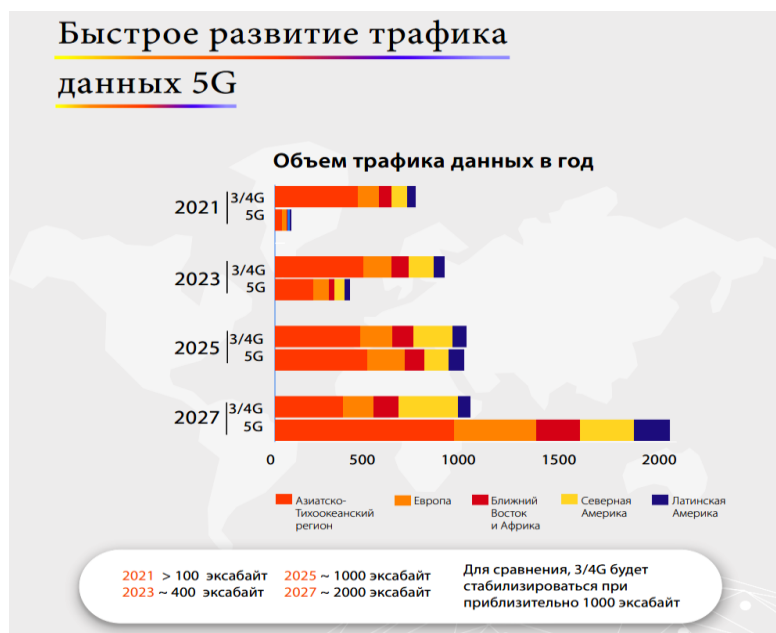


Рис. 1. Развитие трафика данных 5G

Новая технология сетей связи привлекает, прежде всего, своими улучшенными характеристиками по отношению к технологии LTE, широко используемой в Республике Беларусь. Основными техническими характеристиками технологии 5G являются:

- пиковая скорость передачи данных – как минимум 20 Гбит/с нисходящей линии связи (то есть от оператора к абоненту) и 10 Гбит/с восходящей линии связи на мобильную базовую станцию. В целом, это означает 20-кратное увеличение скорости по сравнению с 4G LTE;
- плотность соединения 5G – не менее 1 миллиона подключенных устройств на квадратный километр;
- мобильность – 5G позволит абоненту передвигаться со скоростью до 500 км/ч (у 4G – 120 км/ч);

- энергоэффективность – «спящий» режим базовых станций и сокращение радиуса действия сот в плотных сетях позволят значительно уменьшить энергопотребление;
- увеличение спектральной эффективности составит по нисходящей линии 30 бит/с/Гц, на линии вверх – 15 бит/с/Гц;
- задержка в идеальных условиях сети 5G составляет до 1 мс (по сравнению с 20 мс для LTE).

Некоторые из перечисленных показателей, такие как, например, пиковая скорость передачи данных и автономность, оказываются несовместимыми и даже взаимоисключающими. В зависимости от степени важности (высокая, средняя, низкая) того или иного показателя можно выбирать разные виды сценариев оказания услуг радиоподвижной связи. В концепции Network Slicing, например, физическая архитектура 5G будет разделена на множество виртуальных сетей или слоев, предназначенных для своего сценария использования. Каждый сценарий будет удовлетворять тому или иному набору ранее указанных показателей и, соответственно, нацелен на определенный сегмент рынка [3].

Спецификация 3GPP TS 38.211 V1.2.0 (2017-11) определяет всего три сценария (рис. 2):

- eMBB (enhanced Mobile Broadband – сверхширокополосная мобильная связь);
- URLLC (Ultra-Reliable Low Latency Communication – сверхнадежная связь с низкими задержками);
- mMTC (massive Machine-Type Communications – массовая межмашинная связь).



Рис. 2. Сценарии оказания услуг мобильной связи

Наличие таких характеристик сетей связи стандарта 5G даст мощный толчок для развития технологичных решений, таких как Интернет вещей, беспилотных автомобилей, телемедицины, виртуальной и дополненной реальности, машинного зрения и искусственного интеллекта и др.

В настоящее время в Республике Беларусь для осуществления производственных и управленческих задач на предприятиях и в учреждениях возможностей сетей связи стандарта 4G достаточно. Однако, дальнейшее развитие производства и потребительских сервисов, в первую очередь базирующихся на технологиях искусственного интеллекта, Интернета вещей, виртуальной и дополненной реальности, в ближайшей перспективе станет затруднительно без использования 5G.

Внедрение 5G может происходить двумя путями:

- 1) эволюционным – через определение «точек роста» путем реализации пилотных проектов, постепенно демонстрируя возможности 5G и формируя спрос со стороны бизнеса и населения на услуги и устройства, поддерживающие стандарты связи пятого поколения;
- 2) революционным – за счет накопления необходимого технологического и финансового капитала и одномоментного перехода к стандарту 5G.

Анализ мирового опыта показал, что чаще всего стандарт 5G в разные сферы экономики стран внедрялся эволюционным путем. Очевидно, такой путь реализации технологий целесообразен и для нашего государства. Наиболее перспективными отраслями экономики по внедрению сетей связи 5G являются промышленность, транспорт и логистика, энергетика, ЖКХ, здравоохранение, образование, торговля, а также сферы развлечений, культуры, туризма. Поэтому в каждой отрасли необходимо определить возможные «точки роста» за счет использования цифровых технологий на основе сетей связи пятого поколения.

Точками роста в **промышленности** при внедрении технологии 5G являются предприятия с высоким уровнем автоматизации и цифровизации бизнес-процессов. Выбор того или иного предприятия для внедрения технологий 5G и достижения при этом максимального экономического эффекта должен осуществляться на основе сформированных критериев. Такими критериями могут стать:

- 1) определение первоочередных градообразующих предприятий промышленности для внедрения технологии 5G;
- 2) уровень автоматизации, цифровизации и цифровой трансформации бизнес-процессов на выбранном градообразующем предприятии или группе взаимосвязанных предприятий;
- 3) уровень кооперации выбранного градообразующего предприятия с другими предприятиями или секторами промышленности (экономики) при производстве продукции;
- 4) уровень последующего влияния выбранного градообразующего предприятия на другие отрасли экономики при внедрении технологии 5G т. е. возможность использования данного предприятия как базового в качестве «точки роста» при подключении технологии 5G в районе, городе, регионе;
- 5) затраты при внедрении технологии 5G на выбранном градообразующем предприятии или группе предприятий;
- 6) максимальный экономический эффект при внедрении 5G с учетом реализации продукции предприятия на внешних рынках.

Наиболее востребованными технологиями при этом будут являться: промышленный Интернет вещей, роботизация производства, машинное зрение и искусственный интеллект. Дистанционное управление роботами по каналам связи 5G приведет к снижению издержек, уровня травматизма на производстве, повышению качества продукции. Важным представляется и повышение гибкости производства (самонастраиваемости производственных линий). Это будет возможно за счет обеспечения очень низких задержек в передаче данных в сетях 5G. Также возможно развертывание «умных» сетей электропередач. Использование датчиков позволит мгновенно обнаруживать повреждения на линии электропередач и блокировать распространение последствий повреждения дальше по линии, что приведет к тому, что повреждение затронет меньшее число потребителей [4].

В **сельском хозяйстве** при использовании технологий пятого поколения могут быть реализованы два направления: «умное» растениеводство и «умное» животноводство, которые могут выступать как «точки роста» сельскохозяйственной продукции.

При единичных случаях использования данных технологий в сельскохозяйственных предприятиях, когда нет необходимости передавать большие массивы данных с высокими скоростями, возможно для их реализации достаточно наличие устойчивого покрытия территории технологиями связи 4G.

Однако в долгосрочной перспективе с широким применением Интернета вещей на объектах сельхозпредприятий, роботизацией производства, созданием цифровых платформ управления ими с системами сбора и аналитики данных потребуются технологии связи пятого поколения. При этом наиболее востребованными платформенными сервисами на основе сетей связи пятого поколения могут быть:

- сбор данных об эксплуатации техники и состоянии почв, оптимизация процессов, контроль сбора урожая, экономия ресурсов техники на их основе с применением облачных сервисов;
- дистанционное управление сельхозтехникой на базе беспилотной техники для посева, культивации и сбора урожая;
- видеонаблюдение, анализ состояния полей, высокоточное внесение удобрений и обработка пестицидами с дронов;
- сбор и обработка данных о состоянии скота: реализация в виде облачных сервисов для фермерских хозяйств;
- мониторинг состояния и уход за животными на основе машинного распознавания видео;
- развитие систем прослеживаемости и контроля качества на основе применения в них блокчейн-технологий.

Применение беспилотных летательных аппаратов в сельском хозяйстве республики также целесообразно рассматривать как перспективное направление и «точку роста» эффективности сельхозпроизводства. Это обуславливается возможностью обработки особенно заболоченных полей, угодий, где затруднен или невозможен въезд наземной техники, исключения механического повреждения почвы и растений, экономии финансов за счет низкой стоимости обработки посевов.

Перспективными направлениями внедрения технологий на основе 5G в **финансовой сфере** могут стать:

1. Цифровой банкинг – совместно с 5G позволит быстро получать доступ в Интернет в удаленных местах (что в настоящее время является актуальной задачей) и позволит финтех-

компаниям привлекать больше клиентов. Технология 5G также поможет создать удобный пользовательский интерфейс на мобильных устройствах и осуществлять мгновенные платежи и другие транзакции, что будет способствовать развитию других взаимосвязанных отраслей (торговля, туризм, культура и развлечения).

2. Поточковая передача видео в высоком разрешении с поддержкой 5G позволит финансовым учреждениям предоставлять своим клиентам беспрепятственные видеоконсультации (в том числе и для клиентов в труднодоступных местах). А технология дополненной реальности улучшит сервисы оказания виртуальной помощи и удаленного устранения неисправностей, что является важной составляющей таких сфер финансовой деятельности, как страхование и лизинг.

3. Искусственный интеллект и машинное обучение обеспечат защиту от мошенничества, позволяя обнаруживать недобросовестные действия на раннем этапе. Обработка данных и консультации, проверка и подтверждение транзакций, а также возможность просмотра нескольких экземпляров данных в режиме реального времени помогают уменьшить количество ошибок, повысить безопасность платежей.

4. Применение технологии блокчейн в сетях 5G еще больше ускорит финансовые транзакции, сделает их дешевле, а также повысит их безопасность как для банков, так и для их клиентов. А также будет способствовать разработке новых направлений, расширяющих возможности существующих сервисов и приложений.

5. Интеграция с Интернетом вещей обеспечит создание взаимосвязанных финансовых экосистем. Например, «умные» банкоматы могут использовать 5G для связи с другими устройствами и предоставлять клиентам персонализированные услуги, в том числе и в удаленных местах.

Применение Интернета вещей совместно с 5G в *логистике* предполагает реализацию следующих направлений [4]:

- мониторинг состояния активов, посылок и людей в режиме реального времени по всей цепочке создания стоимости;
- измерение их производительности, внесение изменений в их текущие действия (или в то, что они будут делать в будущем);
- автоматизация бизнес-процессов для устранения ручного вмешательства, улучшения качества и предсказуемости, а также снижения затрат;
- оптимизация процессов совместной работы людей, систем и производственных активов, координирования их деятельности;
- оптимизация маршрутов перемещения грузов и, как следствие, снижении энергозатрат.

Мировой рынок ритейла все в большей степени осваивает цифровые технологии (большие данные, блокчейн, Интернет вещей, искусственный интеллект, технологии виртуальной и дополненной реальности), раскрытию потенциала которых в дальнейшем будет способствовать внедрение сетей связи пятого поколения. Перспективными направлениями для дальнейшего цифрового развития *торговли* при условии внедрения 5G станут:

1) использование искусственного интеллекта, глубокого и машинного обучения (голосовые помощники, бухгалтерские решения, идентификаторы счетов);

2) геолокационный маркетинг с использованием GPS, который позволяет подключать клиентов через различные интернет-устройства (мобильный Интернет, smart-watch), что позволит создавать персонализированные предложения со скидками для покупателя, когда он находится в нескольких минутах ходьбы от магазина;

3) видеоаналитика и возникающие возможности «умного магазина», ориентированного на пополнение запасов на полках, оказание в режиме реального времени дополнительного сервиса и уникальных предложений покупателю и «умного склада», позволяющего вести аналитику в разрезе товарных позиций и отслеживать покупательское поведение потребителей;

4) виртуальная и дополненная реальность, обеспечивающие интерактивность и эффект присутствия, что позволит в большей степени воздействовать на эмоции потребителя и способствовать продажам;

5) технология блокчейн, которая позволяет отслеживать продукты на протяжении всего жизненного цикла, а также использовать для предотвращения контрафактной продукции, цифровой идентификации клиентов и формирования единого кошелька покупателя, в котором содержатся все бонусы от различных программ лояльности.

С учетом анализа практик внедрения технологий на основе сетей 5G в зарубежных странах в *здравоохранении* Республики Беларусь в качестве вариантов коммерческого внедрения рекомендуется рассматривать технологии телемедицины и удаленного мониторинга пациентов.

Указанные технологии выступают в качестве «точек роста» эффективности предоставляемых медицинских услуг, и их применение обосновывается повышением качества диагностирования здоровья населения, выявлением заболеваний на ранней стадии и принятием решений по восстановлению здоровья возможностями сети связи стандарта 5G.

В среднесрочной перспективе применение сетей связи 5G в системе здравоохранения возможно для:

- обеспечения передачи больших объемов информации, возникающих в результате проведения радиологических диагностических исследований (томография, рентгенография, маммография, ангиография) и ряда других (УЗИ, эндоскопические исследования) при создании централизованных хранилищ результатов данных исследований;

- осуществления телемедицинских консультаций в режиме реального времени с передачей видеоизображения высокого качества;

- установления диагноза и принятия решения о плане лечения для пациента, определения вероятности послеоперационных осложнений на основе использования искусственного интеллекта, что позволяет при необходимости принимать меры на раннем этапе;

- AR/VR визуализации сложных и удаленных операций при обучении медиков;

- развития роботизированной хирургии;

- развития сервисов дистанционного диагностирования заболеваний, удаленного мониторинга температуры тела, пульса, активности головного мозга, получения видеоинформации от пациентов;

- оптимальной эксплуатации цифровой информационной системы здравоохранения, наряду со стационарной сетью электросвязи.

Внедрение технологий 5G в сфере **образования** позволит расширить возможности по обучению и взаимодействию обучающихся с преподавателями, использовать системы VR и AR, а также искусственный интеллект, посещать виртуальные выставки. В сферу дистанционного образования уже внедряются элементы дополненной реальности, путем создания виртуальных музеев и моделей различных процессов и объектов в классах.

В **сфере развлечений** внедрение 5G связывается с развитием сферы облачных сервисов и, в первую очередь, игровых. Технологии связи четвертого поколения оказали очень сильное влияние на игровую отрасль. Ключевую роль в эволюции онлайн-игр сыграет 5G, представляя игрокам не только улучшение скорости и стабильности соединений, но и новые возможности для создания более глубокого и динамичного игрового опыта. Но чтобы технология 5G стала драйвером развития сферы развлечений, она должна вырасти из тестовой версии в сеть, пригодную для широкого использования. Достижению этой цели будет способствовать увеличение количества пользовательских девайсов, поддерживающих 5G, рост числа облачных сервисов и игр, расширение предложений мобильных операторов.

Для поступательного и устойчивого цифрового развития Республики Беларусь должны быть созданы необходимые и достаточные условия.

Условиями и факторами, определяющими внедрение технологий 5G Республики Беларусь, являются:

- 1) принятые решения о выделении частотного диапазона для развертывания сетей связи стандарта 5G операторами электросвязи;

- 2) наличие Стратегий внедрения технологий стандарта 5G в отраслях и функциональных сферах экономики и «дорожных карт» по их реализации, в которых на отраслевом уровне определены мероприятия цифрового развития, механизмы их реализации и ожидаемый результат, сроки реализации мероприятий, источники финансирования и ответственные исполнители. Кроме того, возможно потребуются принятие других нормативных правовых актов, регулирующих внедрение данной технологии;

- 3) наличие возможности приобретения необходимого телекоммуникационного оборудования для развертывания сетей связи 5G с последующим созданием собственного импортзамещающего производства компонентной базы, роботизированного оборудования, беспилотных транспортных средств и пр.;

- 4) совершенствование материально-технической базы предприятий (организаций, учреждений) путем закупки компьютерного и роботизированного оборудования, средств визуализации и пр.;

- 5) достаточный уровень цифровой зрелости предприятий (организаций, учреждений), обеспечение цифровизации основных и вспомогательных бизнес-процессов;

б) достаточный уровень цифровой грамотности и цифровых компетенций у представителей руководства государственных предприятий (организаций, учреждений), непосредственно принимающих управленческие решения, а также специалистов, обеспечивающих реализацию стратегий внедрения технологий связи 5G в отраслях экономики;

7) выявление приоритетных точек роста в отраслях экономики и их развитие за счет внедрения цифровых технологий;

8) первоначальная реализация пилотных проектов с оценкой полученного эффекта для принятия решения о дальнейшем масштабировании;

9) ресурсное обеспечение внедрения технологий на основе сетей связи 5G в отраслях экономики.

Реализация указанных условий и факторов создаст фундамент для устойчивого цифрового развития предприятий (организаций, учреждений) и, в целом, отраслей экономики и социальной сферы.

**Заключение.** В современных условиях внедрение цифровых технологий выступает необходимым и естественным условием развития экономики, а также рассматривается как мотивирующий фактор обеспечения конкурентоспособности ее секторов. В первую очередь предлагается внедрение технологий на основе сетей связи 5G осуществлять в тех отраслях экономики, которые обладают наибольшим вкладом в ВВП Республики Беларусь. При этом важно определить «точки роста» предприятий (организаций, учреждений) за счет внедрения технологий стандарта 5G.

Перед реализацией пилотных проектов по внедрению технологий на основе 5G целесообразно оценить уровень цифровой зрелости предприятий и уровень цифровых компетенций работников. По результатам оценки определить перечень мероприятий, направленных на достижение требуемых уровней цифровизации предприятия и цифровой грамотности работников для успешной реализации проектов. В целом, необходимо учитывать, что экономические выгоды от внедрения технологии 5G будут возрастать по мере того, как технология начнет набирать масштабы и получать свое широкое распространение в практике.

## PROSPECTS FOR THE INTRODUCTION OF TECHNOLOGIES BASED ON COMMUNICATION NETWORKS OF THE IMT-2020 STANDARD IN ECONOMIC SECTORS

V.M. IVASHKO, E.S. ROMANOVA, O.G. GELIVER

### Abstract

The article discusses the characteristics of the 5G communication network, scenarios for the provision of mobile communication services. The main directions of development of technologies based on 5G communication networks in economic sectors are considered, the conditions and factors influencing the introduction of 5G technologies in the Republic of Belarus are determined.

### Список литературы

1. 5G – технология года 2020 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.kommersant.ru/doc/4586642>. – Дата доступа : 04.04.2024.
2. Развитие сетей 5G в мире, перспективы развития в России [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://dzen.ru/a>. – Дата доступа : 04.06.2024.
3. Батуев, Б. Технологии 5G: поэтапное внедрение и элементная база для абонентского оборудования [Электронный ресурс] / Б. Батуев. – Беспроводные технологии № 4. – 2019. – С.15–27. – Режим доступа : <https://wireless-e.ru/wp-content/uploads/5715.pdf>. – Дата доступа : 04.06.2024.
4. Бутенко, В. В. Сети связи 5G/IMT-2020 и IoT – во все сферы национальной экономики / В. В. Бутенко, Е. Е. Девяткин, Т. А. Суходольская // Электросвязь : ежемесячный научно-технический журнал по проводной и радиосвязи, телевидению, радиовещанию / Региональное содружество в области связи [и др.]. – М. : Инфо-Электросвязь, 2018. – № 8. – С. 6–11.



**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ**

DOI: 0.61726/4747.2024.42.92.001

УДК [004.82+528.9]:004.89

**ИМПЛЕМЕНТАЦИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-СООТНЕСЕННЫХ ДАННЫХ  
В СЕМАНТИЧЕСКИ СОВМЕСТИМЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ**

С.А. САМОДУМКИН

*Учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики  
и радиоэлектроники»,**ул. П. Бровки, 6, 220013, Минск, Беларусь  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-1836-2315>**Поступила 25 ноября 2024*

Рассматривается модель интеллектуальной системы с интегрированными пространственно-соотнесенными данными и имплементация пространственно-соотнесенных данных в интеллектуальных системах, разрабатываемых в соответствии с открытой комплексной технологией разработки интеллектуальных систем на основе семантических сетей.

*Ключевые слова:* пространственно-соотнесенные данные, интеллектуальная система, семантическая сеть, геоинформационная система, база знаний, онтология объектов местности, решатель задач, картографический интерфейс, интеллектуальная система с интегрированными пространственно-соотнесенными данными.

**Введение.** Накопленные человечеством большие наборы пространственно-соотнесенных с территорией Земли данных, их представление и хранение посредством созданных картографических сервисов, развитие технологий дистанционного зондирования Земли способствовали созданию и разработке прикладных геоинформационных систем (ГИС) различного назначения.

Современные ГИС представляют собой компьютерные системы, обеспечивающие ввод, манипулирование, анализ и вывод пространственно-соотнесенных данных о территории, социальных и природных явлениях при решении задач, связанных с инвентаризацией, анализом, моделированием, прогнозированием и управлением окружающей средой и территориальной организацией общества [1]. Поскольку перечисленные задачи являются интеллектуальными, такие системы относятся к классу интеллектуальных систем с интегрированными пространственно-соотнесенными данными (ИСПД).

Вместе с тем предлагаемые в настоящее время инструментальные средства разработки ИСПД не в достаточной мере обладают совместимостью из-за отсутствия унификации знаний предметных областей, в интересах которых проектируются прикладные системы, и онтологий объектов местности и явлений. При этом для фиксированной территории одни и те же пространственные данные используются в разных прикладных областях: эпидемиологии, строительстве, охране окружающей среды, создании цифровых двойников предприятий, мобильных робототехнических системах и т. д., что делает необходимым согласование онтологии предметных областей с объектами местности и явлениями и тем самым обеспечивает вертикальный (предметно-ориентированный) уровень проектирования ИСПД. С другой стороны, при проектировании ИСПД на новую территорию сохраняются основные функциональные требования и необходимо учитывать не только предыдущий опыт проектирования систем, но и использовать ранее спроектированные функциональные компоненты, т. е. речь идет о горизонтальном уровне проектирования ИСПД, когда расширяется территориальная область и проектируются системы на новые территории или в новых временных интервалах.

Таким образом, для проектирования интеллектуальных систем с пространственно-соотнесенными данными необходима разработка программного обеспечения, обеспечивающего имплементацию пространственно-соотнесенных данных в семантически совместимых интеллектуальных системах.

Предлагаемые модели и инструментальные средства являются частью открытой комплексной технологии разработки интеллектуальных систем на основе семантических сетей [2]. При этом разработанные по данной технологии системы лишены недостатков систем, основанных на генеративных моделях (системы типа ChatGPT), поскольку происходит не генерация новых данных, которые похожи на обучающие данные, а устанавливаются отношения между фактическими данными и знаниями предметной области, что обеспечивает достоверность выводов на основе знаний. В связи с чем в данной работе под интеллектуальной системой с интегрированными пространственно-соотнесенными данными (синоним интеллектуальная геоинформационная система) понимается информационная система, предназначенная для выдачи ответов на вопрос пользователя, основным объектом исследования которой являются знания и данные об объектах местности (явления), организованные в виде баз знаний, выступающие интеграционной основой для решения прикладных задач в различных предметных областях.

**Основная часть.** Формально модель интеллектуальной системы с интегрированными пространственно-соотнесенными данными задается следующим образом:

$$S_{SRD} = \{M_{BK}, S_P, UI_{Map}\},$$

где  $M_{BK}$  – семантическая модель базы знаний;  $S_P$  – семантическая модель решателя задач;  $UI_{Map}$  – семантическая модель пользовательского интерфейса.

Семантическая совместимость знаний достигается за счет онтологии пространственных объектов, в задачу которой входит четкое и однозначное определение семантики объектов местности и явлений. Формально онтология пространственных объектов задается следующим образом:

$$O_{SRD} = \{O_{To}, O_{GeoCH}\},$$

где  $O_{To}$  – онтология объектов местности и явлений;  $O_{GeoCH}$  – семантические характеристики объектов местности и явлений.

В онтологии объектов местности и явлений объектами классификации являются объекты местности и явления, которым соответствуют объекты карты, а также признаки (характеристики) этих объектов. В данном разделе онтологии представлены классы геопропространственных понятий, имеющие общие признаки, характерные для определенного класса объектов местности. Таким образом, объекты местности и классы объектов местности предназначены для разных целей. Объекты местности формируются в базе знаний по спецификациям, заданным в онтологии объектов местности и явлений. Соответственно в базе знаний хранятся непосредственно знания о конкретном объекте, а в онтологии объектов местности – объект местности является понятием и для него установлены свойства и отношения, заданные для всех объектов данного типа (класса).

Формально раздел онтологии геосемантических характеристик объектов местности задается следующим образом:

$$O_{GeoCH} = \{R_{CLoc}, D_{Cond}, R_S\},$$

где  $R_{CLoc}$  – координатное местоположение объекта местности;  $D_{Cond}$  – динамика состояния объекта местности;  $R_S$  – класс пространственных отношений для установления семантических свойств объекта местности или явления по отношению к другим объектам местности, который, в свою очередь, задается:

$$R_S = \{R_{Top}, R_M, R_{SO}, R_{S.md}\},$$

где  $R_{Top}$  – класс топологических пространственных отношений;  $R_M$  – метрическое пространственное отношение;  $R_{SO}$  – отношение пространственной упорядоченности;  $R_{S.md}$  – отношение главных направлений объектов местности.

Обобщенная структура интеллектуальной системы с интегрированными пространственно-соотнесенными данными, соответствующая представленной модели, приведена на рис. 1, где показано взаимодействие пользователя системы, а также основных составляющих компонентов (семантическая память, решатель задач и картографический интерфейс).



Рис. 1. Обобщенная структура интеллектуальной системы с интегрированными пространственно-соотнесенными данными

Способом выражения информационной потребности пользователя в интеллектуальных системах является вопрос [3]. Представление структурированной информации и установление отношений между понятиями в базе знаний упрощает формирование информационной потребности пользователя, поскольку при формировании базы знаний происходит установление субъектно-объектных отношений в рамках заданной предметной области средствами семантического кода (SC-кода).

Целью разработки языка вопросов для интеллектуальных систем с интегрированными пространственно-соотнесенными данными и последующего его развития является реализация возможности понимания действий, осуществляемых такой системой, при формировании ответа на поставленный вопрос. В процессе формирования ответа на поставленный вопрос возможны следующие варианты: 1) ответ существует в базе знаний и происходит локализация фрагмента базы знаний; 2) ответ связан с разрешением некоторой задачной ситуации, которая содержится в контексте вопроса, и формирование ответа на вопрос возлагается на решателя задач.

В связи с этим интеллектуальная система с интегрированными пространственными данными декомпозируется на следующее множество систем:

$$S_{испд} = \{S_{иипс}, S_{го}\},$$

где  $S_{иипс}$  – интеллектуальная информационно-поисковая система;  $S_{го}$  – подсистема генерации ответов.

Декомпозиция ИСПД в соответствии со схемой, представленной на рис. 1, на базу знаний, решатель задач и интерфейс пользователя позволяет выделить три этапа проектирования системы.

Первый этап проектирования связан с формализацией знаний и представлением их в базе знаний ИСПД. Формализованные в соответствии с семантической технологией проектирования баз знаний интеллектуальных систем предметные знания и формулировки вопросов на семантическом коде находятся в базе знаний интеллектуальной системы с интегрированными пространственными данными.

Второй этап – это реализация операций обработки знаний, находящихся в системе, т. е. проектирование решателя задач интеллектуальной системы.

В подсистеме  $S_{иипс}$  для каждого семантического класса вопросов сопоставляются информационно-поисковые операции решателя задач. В первом случае – предикатный вопрос, когда пользователь задает вопрос по шаблону. Результатом является ответ, сформированный при помощи базовых навигационно-поисковых операций. Во втором случае, когда нет четкого образца поиска, требуется специализированная процедура поиска в зависимости от семантического класса вопроса,

а сам ответ имеет сложную процедуру локализации (это при том, что ответ явно имеется в текущем состоянии системы).

В подсистеме  $S_{го}$  для каждого вопроса проектируются в общем случае множество операций в решателе задач, позволяющих сгенерировать ответ пользователю на основе имеющихся в базе знаний: предметных знаний, логических закономерностей, способов решений задач определенного класса, алгоритмов вычислений.

Третий этап – реализация пользовательского интерфейса в соответствии с семантической технологией проектирования пользовательских интерфейсов интеллектуальных систем, т. е. реализация диалога конечного пользователя с системой. Интерфейс пользователя позволяет управлять диалогом пользователя при запросах к системе или ответах.

При этом интеллектуальная информационно-поисковая система представляется кортежем следующего вида:

$$S_{интпс}: \{\{Q\}, \{A\}, \{F\}, \{UI\}\},$$

где  $\{Q\}$  – совокупность вопросов;  $\{A\}$  – совокупность ответов, имеющихся в текущем состоянии системы;  $\{F\}$  – совокупность операций решателя задач, осуществляющих поиск и генерацию ответов на вопросы пользователей;  $\{UI\}$  – совокупность способов визуализации ответов пользователю.

Каждый вопрос, входящий в множество вопросов  $\{Q\}$ , вне зависимости от способа его задания с помощью пользовательского интерфейса, имеет поисковое предписание – представление информационного вопроса в виде поискового образа вопроса и задание на поиск на языке вопросов. Данное поисковое предписание есть sc-конструкция, т. е. информационная конструкция, представленная в семантическом коде. Это позволяет, во-первых, организовать многомодальный пользовательский интерфейс, когда имеются возможности эквивалентного построения вопроса пользователя различными интерфейсами, а, во-вторых, обеспечить совместимость со всеми компонентами системы. Ответ представляет собой результаты поиска и также представляется SC-конструкцией. Управление способом представления ответов и вопросов пользователей осуществляется пользовательским интерфейсом ИСПД.

С целью формального описания языка вопросов для интеллектуальных систем с интегрированными пространственно-соотнесенными данными необходимо задать синтаксис данного языка и определить денотационную и операционную семантику. Соответственно синтаксис языка вопросов является подмножеством синтаксических конструкций семантического кода, что позволяет отнести язык вопросов к семейству семантических совместимых языков – sc-языков и предназначен для формального описания поискового предписания. Денотационная семантика направлена на формальное уточнение формулировок вопросов средствами семантического кода, а операционная семантика языка вопросов определяется множеством sc-агентов вывода ответов на поставленные в процессе диалога пользователя с интеллектуальной системой.

Для систематизации типов вопросов введены следующие отношения: *отношение в рамках заданного вопроса* – определенное отношение между знаками предметной области в контексте вопроса; *базовое отношение в рамках заданного вопроса* – класс отношений, объединяющий отношения в заданном вопросе, отражающие однотипный смысл и раскрывающие определенный признак знаков предметной области (отношение состояния, отношение действия, отношение состава, теоретико-множественное отношение, темпоральное отношение, пространственное отношение, количественное отношение, качественное отношение); *составное отношение в рамках заданного вопроса* – устойчивая комбинация двух отношений действия: *действия, направленного на параметр вопроса, и действия, направленного на ответ на вопрос*.

Все агенты, выводящие ответы на поставленные вопросы, формируют многоагентную систему – интерпретатор языка вопросов для интеллектуальных справочных систем с интегрированными пространственно-соотнесенными данными, где каждому классу вопросов соответствуют определенные агенты, реализующие поиск или синтез из базы знаний ИСПД соответствующих ответов на поставленные вопросы.

В соответствии с предложенной моделью и структурой ИСПД, языка вопросов на рис. 2 представлена схема программных компонентов, обеспечивающих имплементацию пространственно-соотнесенных данных в интеллектуальных системах на основе картографического сервиса OpenStreetMap (OSM).

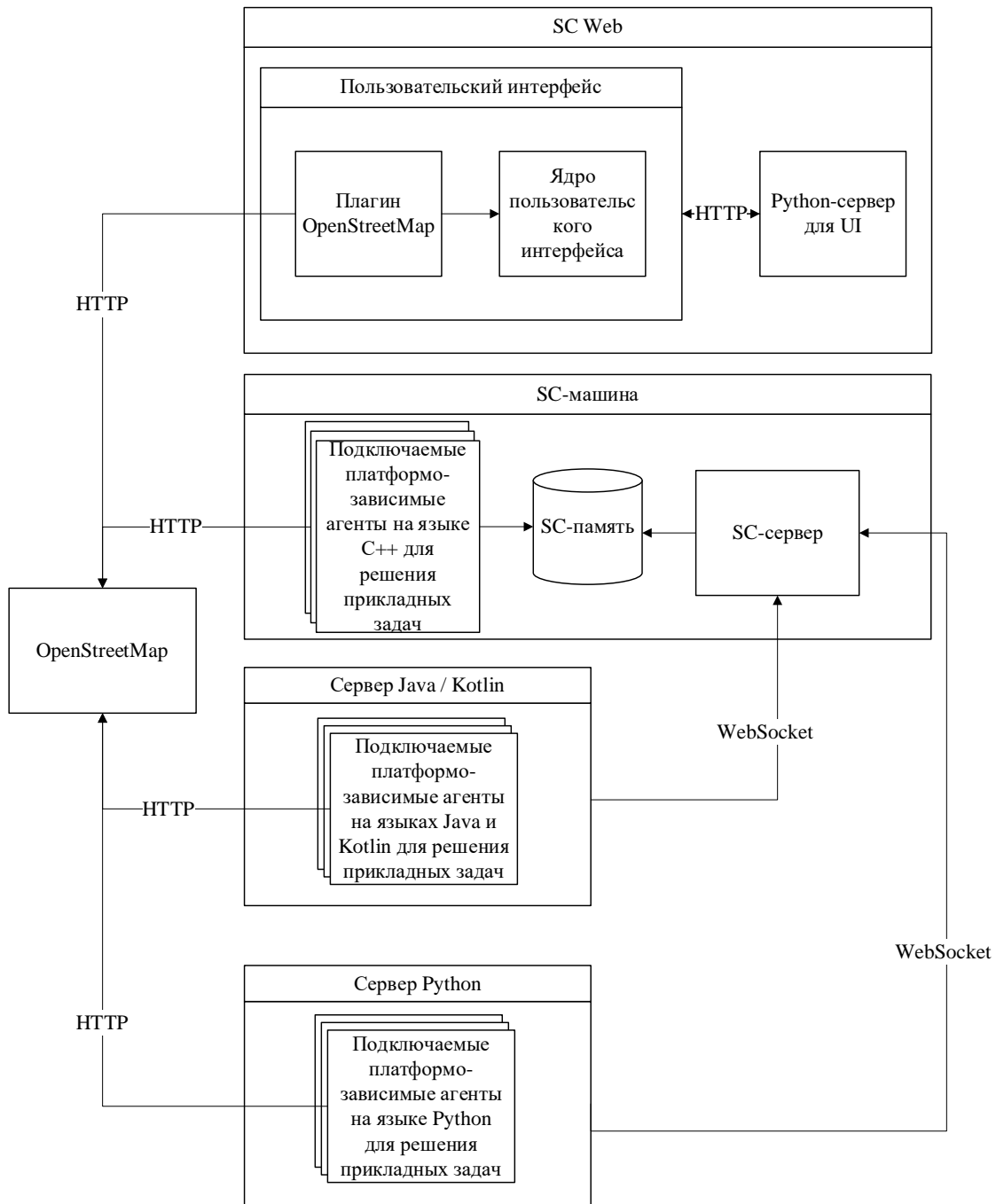


Рис. 2. Схема программных компонентов, обеспечивающих имплементацию пространственно-соотнесенных данных в интеллектуальных системах на основе картографического сервиса OpenStreetMap

Особенность программной реализации заключается в том, что обеспечивается доступ к картографическим данным, которые собраны сообществом заинтересованных пользователей и включают практически полное описание объектов местности всей Земли, тем самым отсутствует необходимость в сборе картографического материала при проектировании прикладных систем, а требуется верификация и отбор существующих в картографическом сервисе пространственных данных. При этом OpenStreetMap распространяется под свободной лицензией и позволяет получать доступ как к растровым картам, так и ко всем лежащим в их основе пространственным данным с помощью запросов Overpass [4]. Пример взаимодействия при использовании пространственно-соотнесенных данных представлен на рис. 3

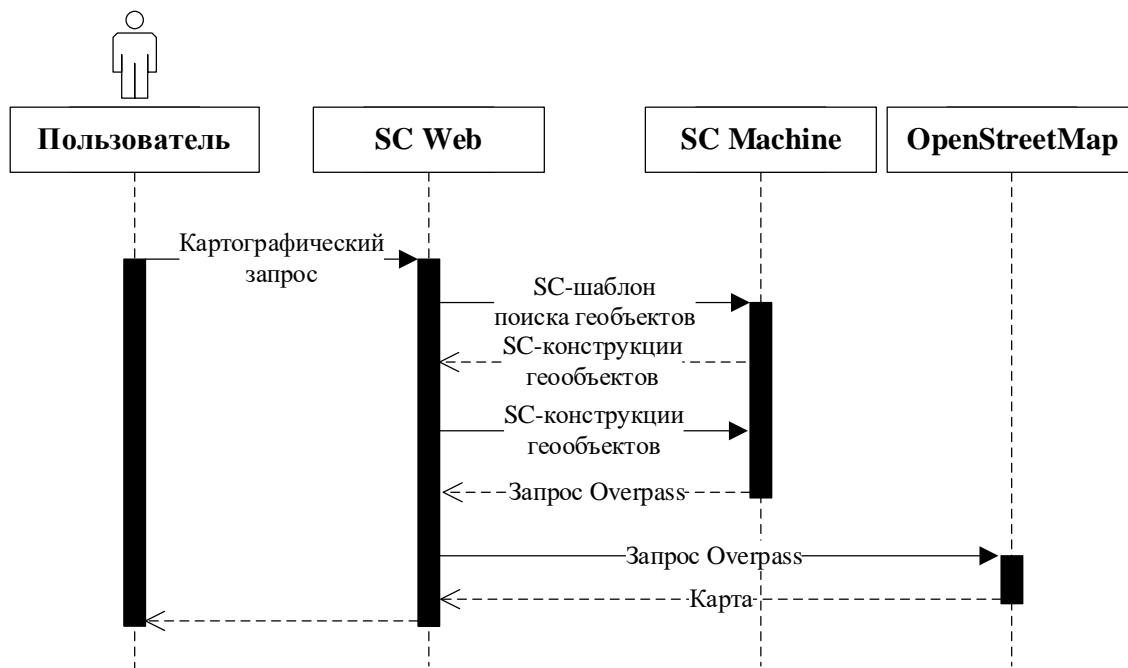


Рис. 3. Пример взаимодействия при использовании пространственно-соотнесенных данных

**Заключение.** Предложенная в работе семантическая модель ИСПД, включающая семантическую память, решатель задач и картографический интерфейс, позволяет интегрировать в базу знаний объекты местности и явления заданной территории, транслированные на внутренний язык базы знаний, и знания различных предметных областей, а также осуществлять взаимодействие на семантически совместимом с языками представления и обработки знаний языке вопросов и предназначенном для формального описания поискового предписания с целью удовлетворения информационной потребности пользователя. Программная реализация картографического интерфейса ИСПД на основе картографического сервиса OpenMapStreet позволяет имплементировать пространственно-соотнесенные данные с целью их использования семантически совместимыми интеллектуальными системами.

## IMPLEMENTATION OF SPATIALLY REFERENCED DATA IN SEMANTICALLY COMPATIBLE INTELLIGENT SYSTEMS

S. SAMODUMKIN

The model of intellectual system with integrated spatially-referenced data and implementation of spatially-referenced data in intellectual systems developed in accordance with the open complex technology of development of intellectual systems on the basis of semantic networks is considered.

### Список литературы

1. Интеллектуальные технологии в геоинформационных системах : учеб. пособие / А. Н. Крючков [и др.]; под науч. ред. В. В. Голенкова. – Минск : БГУИР, 2006. – 201 с.
2. Технология комплексной поддержки жизненного цикла семантически совместимых интеллектуальных компьютерных систем нового поколения / под ред. В. В. Голенкова – Минск : Бестпринт. – 2023. – 1064 с.
3. Сулейманов, Дж. Ш. Система семантического анализа ответных текстов обучаемого на естественном языке / Дж. Ш. Сулейманов // Онтология проектирования. – 2014. – № 1 (11). – С. 65–77.
4. OpenStreetMap [Electronic resource]. – Mode of access : <https://www.openstreetmap.org/>. – Date of access : 28.09.2024.

DOI: 10.61726/6666.2024.86.71.001

УДК 004.738;615.47

**СТРУКТУРА СЕТИ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ И АЛГОРИТМЫ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ НЕВРОЛОГИЧЕСКОГО ЗАБОЛЕВАНИЯ**В.А. ВИШНЯКОВ<sup>1</sup>, С. ИВЕЙ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»,

ул. П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2929-8958>

<sup>2</sup>Учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»,

ул. П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0269-4320>

Поступила в редакцию 03 апреля 2024

Цель статьи – исследовать инновационный подход, использующий технологии машинного обучения, нейронных сетей, обработки сигналов, сети Интернета вещей (IoT) для раннего выявления болезни Паркинсона. Представлена модель и алгоритмы обработки звуковых сигналов от пациентов, исследуемых на вероятность заболевания болезнью Паркинсона. Приведена структура и функции сети интернета вещей, которая использует Thingspeak в качестве платформы, позволяя собирать голосовые данные с помощью мобильных телефонов, извлекать из них соответствующие функции и обрабатывать данные. В рамках этого процесса для расчета вероятности болезни Паркинсона используется модель полностью подключенной нейронной сети (FCNN), которая предоставляет медицинским работникам и пациентам удобный, точный и ранний диагностический ИТ-инструмент. В исследовании рассматриваются структура, алгоритмы и роль FCNN в сети Интернета вещей, подчеркивается ее влияние на сектор ИТ медицины.

*Ключевые слова:* технология Интернет вещей, удаленная ИТ-диагностика, анализ голосовых данных, шумоподавление, нейронная сеть.

**Введение.** По мере дальнейшего развития общества и прогресса науки и техники все большее внимание уделяется раннему выявлению и диагностике проблем со здоровьем. Болезнь Паркинсона как хроническое неврологическое заболевание оказывает глубокое влияние на качество жизни заболевших людей. Ранняя диагностика имеет решающее значение для обеспечения более эффективного лечения и ухода [1, 2]. В работе [3] авторы представили подход к распознаванию болезни Паркинсона на основе голосового анализа. Основываясь на нем, авторы предложили использовать сеть Интернета вещей, которая собирает голосовые данные с помощью мобильных телефонов, извлекает соответствующие функции, облегчает передачу и обработку данных и, в конечном счете, выводит вероятность болезни Паркинсона. Внедрение этого метода обещает предоставить более удобный, точный и ранний диагностический инструмент как для медицинских работников, так и для пациентов. В этой статье авторы рассматривают структуру и алгоритмы работы этой сети Интернет.

**Методы исследования.** Первоначально голосовые данные собираются и предварительно обрабатываются с помощью мобильного телефона. Это включает в себя сбор речевых данных от пациентов с болезнью Паркинсона (БП) в течение 5 секунд с частотой дискретизации 44,1 кГц. Для повышения качества сигнала используется алгоритм спектрального вычитания [4] для устранения окружающего шума.

Впоследствии характеристики извлекаются из предварительно обработанных речевых данных после подавления шума. Затем они передаются на голосовой канал платформы Интернета вещей Thingspeak. В платформе Thingspeak данные передаются в функцию анализа MATLAB.

Модуль анализа MATLAB играет ключевую роль в интерпретации данных путем загрузки 3-уровневой модели FCNN, развернутой в облаке. Он обрабатывает данные и генерирует значение вероятности, указывающее на вероятность возможного диагноза болезни Паркинсона.

Наконец, результаты передаются с платформы Thingspeak IoT на мобильный телефон через функцию ThingHTTP и отображаются на телефоне для дальнейшего изучения и оценки.

**Модель и алгоритмы сбора и обработки данных.** I. Модель и алгоритм вычитания спектра для голосовых данных. Процесс включает следующие шаги:

1. Разделение исходного звукового сигнала на кадры, длина каждого кадра составляет 256 сэмплов, используя 50 % перекрытие, чтобы разделить кадры и получить серию кадров сигнала. Пусть исходный звуковой сигнал обозначается как  $S[n]$ , где  $n$  – индекс выборки. Пусть длина кадра равна  $L = 256$  выборкам, а процент перекрытия равен 50 %. Определим индекс кадра  $k$  таким образом, чтобы начальный индекс  $k$ -го кадра задавался формулой:

$$n_k = (k - 1) \times \frac{L}{2}, k = 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

затем  $k$ -й кадр сигнала задается следующим образом:

$$s_k[n] = s[n_k + n_{k+1}], 0 \leq n < L. \quad (2)$$

2. Выполнение преобразования Фурье для каждого кадра сигнала, чтобы получить соответствующий спектр; применение оконной функции  $w[n]$  к кадру, чтобы уменьшить спектральную утечку, такую как окно Хэмминга или окно Ханнинга. Вычисление преобразования Фурье оконного фрейма, чтобы получить комплексный спектр  $X_k[f]$ :

$$X_k[f] = \text{sum} \left( w[n] \times s_k[n] \times \exp \left( -j \times 2 \times \pi i \times f \times \frac{n}{L} \right) \right), 0 \leq f \leq \frac{L}{2} \quad (3)$$

3. Усреднение спектра всех кадров, чтобы получить средний спектр всего сигнала, и использование его в качестве основы для расчета спектра шума. Пусть  $X_k[f]$  – комплексный спектр  $k$ -го кадра сигнала. Вычисление среднего спектра всех кадров следующим образом:

$$X_{avg}[f] = \left( \frac{1}{K} \right) \times \text{sum}(X_k[f]), \quad (4)$$

где  $K$  – число кадров.

Использование алгоритма спектрального вычитания  $X_{avg}[f]$  в качестве основы для вычисления спектра шума.

4. Фильтрация спектра шума, чтобы получить более точную оценку шума. Пусть  $X_{noise}[f]$  – спектр шума, оцененный по  $X_{avg}[f]$ . Применение фильтра Винера к  $X_{noise}[f]$ , чтобы получить более точную оценку:

$$X_{noise}^{filtered}[f] = \frac{X_{noise}[f]}{(X_{noise}[f] + \alpha * X_s[f])}, \quad (5)$$

где  $\alpha$  – параметр сглаживания, а  $X_s[f]$  – спектр оригинального сигнала.

5. Сравнение спектра каждого кадра со спектром шума, отобранного фильтром Винером, вычисление отношения сигнал/шум и рассмотрение частотных составляющих с отношением сигнал/шум менее 10 дБ в качестве шумовых составляющих [5]. Пусть  $X_k[f]$  – комплексный спектр  $k$ -го кадра сигнала. Вычисление отношения сигнал/шум (SNR) для каждой частотной составляющей в виде:

$$SNR[f] = 10 \times \log_{10} \left( \frac{|X_k[f]|^2}{|X_{filtered}[f]|^2} \right). \quad (6)$$

Определение частотных составляющих с  $SNR < 10$  дБ в качестве составляющих шума.

6. Вычитание частотных составляющих шума, установив коэффициент равным 0,5, чтобы получить спектр, удаленный от шума. Пусть  $X_k^{noiseless}$  – бесшумный спектр  $k$ -го кадра сигнала. Для каждой частотной составляющей, если  $SNR[f] < 10$  дБ, установить величину  $X_k^{noiseless}[f]$  равной 6:

$$|X_k^{noiseless}[f]| = 0.5 \times |X_k[f] - X_{noise}^{filtered}[f]|. \quad (7)$$

7. Чтобы получить полный сигнал после удаления шума, нужно преобразовать удаленный шумом спектр обратно во временную область и наложить каждый кадр. Пусть  $X_k^{noiseless}[f]$  – бесшумный сигнал в частотной области  $k$ -го кадра сигнала, а  $X_k^{noiseless}$  – соответствующий сигнал во временной области. Аналогично пусть  $Y_k[f]$  – удаленный от шума спектр  $k$ -го кадра, а  $Y_k[n]$  – соответствующий сигнал во



временной области. Чтобы преобразовать удаленный шумом спектр обратно во временную область, мы можем применить обратное преобразование Фурье к  $Y_k[f]$ , что дает нам  $Y_k[n]$ :

$$Y_k[n] = IFFT(Y_k[f]). \quad (8)$$

Затем можно объединить удаленный от шума сигнал каждого кадра, чтобы получить полный сигнал без шума:

$$x_{noiseless}[n] = \text{sum}_k(x_k^{noiseless}[n] \times w_k[n]), \quad (9)$$

где  $w_k[n]$  – оконная функция, применяемая к каждому кадру, и сумма берется по всем кадрам.

На рис. 1 показана блок-схема предварительной обработки данных.

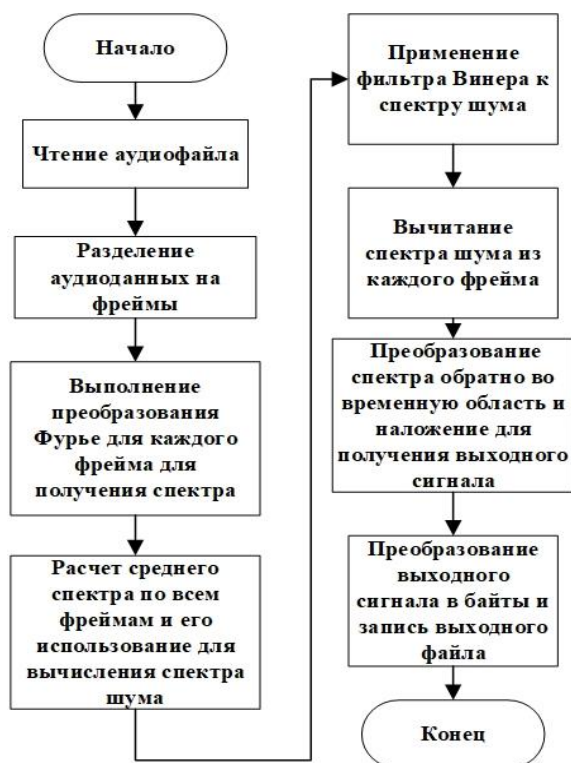


Рис. 1. Блок-схема предварительной обработки данных

II. Голосовые данные после устранения шума отображаются в окне. Основное преимущество использования окна Хэмминга [6] для извлечения окна сигнала заключается в том, что оно может уменьшить эффект колебаний на краю окна, сохраняя основные компоненты сигнала внутри окна. Размер окна составляет 1024, а частота голосовых данных – 44,1 кГц. Частота голосовых данных составляет 44,1 кГц, а частота перекрытия окна составляет 50 %, поэтому время речи в окне составляет около 23 мс.

Пусть  $x[n]$  – исходный сигнал во временной области с частотой дискретизации  $f_s = 44,1$  кГц. Пусть  $w[n]$  – окно Хэмминга размером  $N = 1024$ . Оконный сигнал  $x_w[n]$  получается путем умножения  $x[n]$  на значение окна  $w[n]$  и сдвига окна на размер перехода  $H = \frac{N}{2}$ :

$$x_w[n] = x[n] \times w[n - n_0], \quad (10)$$

где  $n_0 = k \times H$  целых  $k$ .

Окно Хэмминга  $w[n]$  определяется как:

$$w[n] = 0.54 - 0.46 \times \cos\left(2 \times \pi i \times \frac{n}{N-1}\right), 0 \leq n \leq N-1 \quad (11)$$

Длительность каждого оконного сегмента равна  $T = \frac{N}{f_s} = \frac{1024}{44100}$ ,  $S = 0.023$  sec (23 ms), а перекрытие между соседними сегментами равно  $H/T = 2$ .

**Извлечение признаков.** Функция извлечения голосовых данных [7] выполняется в указанном окне, как показано в табл. 1 ниже.

Таблица 1

## Извлечение всех объектов

Номер	Название объекта	Описание
1	MDVP:Fo(Hz)	Средняя основная частота вокала
2	MDVP:Fhi(Hz)	Максимальная основная частота вокала
3	MDVP:Flo(Hz)	Минимальная основная частота вокала
4	MDVP:Jitter(%)	Мера изменения основной частоты (в процентах)
5	MDVP:Jitter(Abs)	Мера изменения основной частоты (абсолютное значение)
6	MDVP:RAP	Мера изменения основной частоты (относительное амплитудное возмущение)
7	MDVP:PPQ	Мера изменения основной частоты (коэффициент возмущения периода основного тона)
8	Jitter:DDP	Мера изменения основной частоты (среднее значение абсолютных разностей разностей между соседними периодами)
9	MDVP:Shimmer	Мера изменения амплитуды (локальное изменение амплитуды)
10	MDVP:Shimmer(dB)	Мера изменения амплитуды (локальное изменение амплитуды в дБ)
11	Shimmer:APQ3	Мера изменения амплитуды (коэффициент амплитудного возмущения, 3-балльный метод)
12	Shimmer:APQ5	Мера изменения амплитуды (коэффициент амплитудного возмущения, 5-балльный метод)
13	MDVP:APQ	Мера изменения амплитуды (коэффициент возмущения средней амплитуды)
14	Shimmer:DDA	Мера изменения амплитуды (средняя абсолютная разница амплитуд между последовательными периодами)
15	NHR	Отношение шума к тональным составляющим в голосе
16	HNR	Отношение гармоник к шуму в голосе
17	RPDE	Мера нелинейной динамической сложности
18	D2	Мера нелинейной динамической сложности
19	DFA	Показатель фрактального масштабирования сигнала
20	spread1	Нелинейная мера изменения основной частоты
21	spread2	Нелинейная мера изменения основной частоты
22	PPE	Нелинейная мера изменения основной частоты

**Передача и обработка данных.** Чтобы загрузить 22 функции в Thingspeak [8] IoT для анализа выполняется алгоритм.

1. Создание канала. На рис. 2 ниже показана настройка голосового канала.

Channel Settings

Percentage complete 30%

Channel ID 2045599

Name

Description

Field 1

Field 2

Field 3

Field 4

Field 5

Field 6

Field 7

Field 8

Рис. 2. Настройки голосового канала

2. Получение API-ключа записи/чтения голосового канала и идентификатора канала. На рис. 3 ниже показан API-ключ записи/чтения голосового канала и идентификатор канала.

voice

Channel ID: 2045599  
Author: mwa0000029248662  
Access: Public

Private View Public View Channel Settings Sharing API Keys

Write API Key

Key RT2VJK2XDGSU4G7U

Generate New Write API Key

Read API Keys

Key Y7TRGS2U54UWG92P

Note

Save Note Delete API Key

Add New Read API Key

Рис. 3. Ключ API для записи/чтения и идентификатор голосового канала

3. Использование API Thingspeak. Код библиотеки API использует протокол HTTP для загрузки 22 голосовых функций в голосовой канал. На рис. 4 показан алгоритм загрузки данных ThingSpeak API.

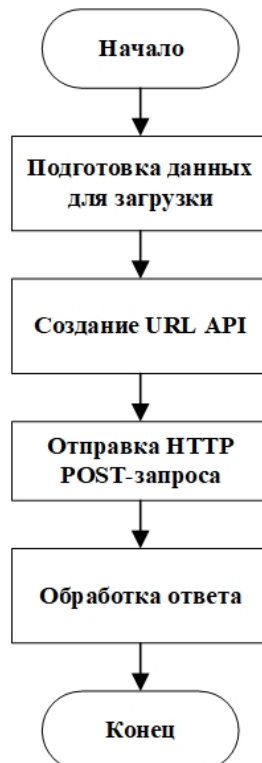


Рис. 4. Алгоритм загрузки данных ThingSpeak API

4. Загрузка предварительно обученной модели CNN [9] в модуль анализа MATLAB и ввод 22 данных в модель для анализа, чтобы получить результаты. Модель была обучена с использованием общедоступного набора данных по болезни Паркинсона [10]. На рис. 5 показаны схемы 3-слойного FCNN.

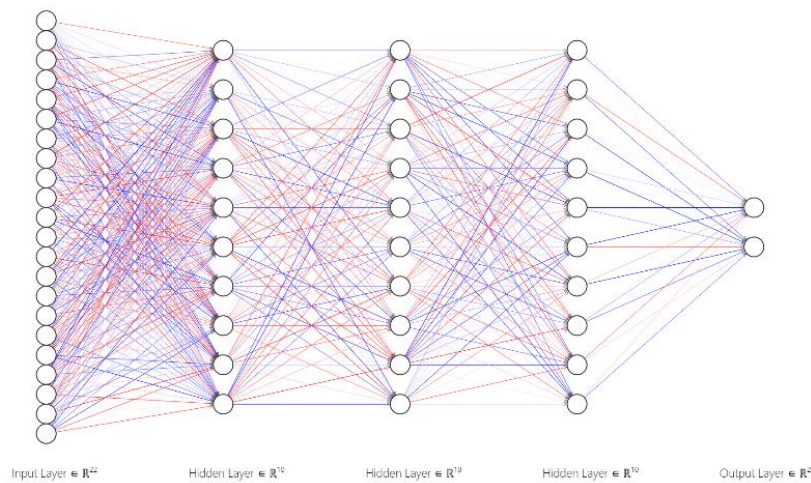


Рис. 5. Схема 3-слойной CNN

В табл. 2 приведены гиперпараметры 3-слойного CNN.

Таблица 2

Гиперпараметры 3-слойной CNN

Имя	Гиперпараметры
Размер первого слоя	10
Размер второго слоя	10
Размер третьего слоя	10
Функция активации	ReLU
Предел итерации	1000
Скорость обучения	0.01
Алгоритм обновления скорости обучения	SGD
Сила регуляризации (Лямбда)	0
Стандартизировать данные	Yes

На платформе Thingspeak сохраняются результирующее значение file1 в голосовом канале, а затем телефон считывает значение file1 из голосового канала.

**Результаты исследований.** На рис. 6 показан процесс ИТ-диагностики. Первоначально голосовые данные записываются на мобильный телефон с последующим извлечением голосовых функций. Затем мобильный телефон передает эти данные на платформу Интернета вещей, используя протокол HTTP. После обработки с помощью модели CNN платформа отправляет результаты идентификации обратно на мобильный телефон по протоколу HTTP для дальнейшего просмотра и анализа.

Процесс начинается с получения исходного сигнала от микрофона, далее сигнал проходит ряд этапов предварительной обработки, включая выделение высоких частот, подавление шума и сегментацию речевого кадра с использованием окна Хэмминга. Затем из этих обработанных данных извлекаются ключевые характеристики и компилируются в наборы данных. Эти наборы данных передаются в нейронную сеть для обучения и оптимизации модели, визуально представленную на рисунке в виде многослойной структуры. Завершением обучения и оптимизации является создание файла модели, способного классифицировать голосовые вводимые данные.

Платформа Интернета вещей Thingspeak предоставляет функциональные возможности для визуализации, хранения и управления данными. Оптимизированная модель разворачивается и взаимодействует с внешними приложениями, как показано в запросах API и голосовом интерфейсе. Эта платформа объединяет моделирование нейронных сетей с облачным управлением данными для получения точных результатов распознавания.

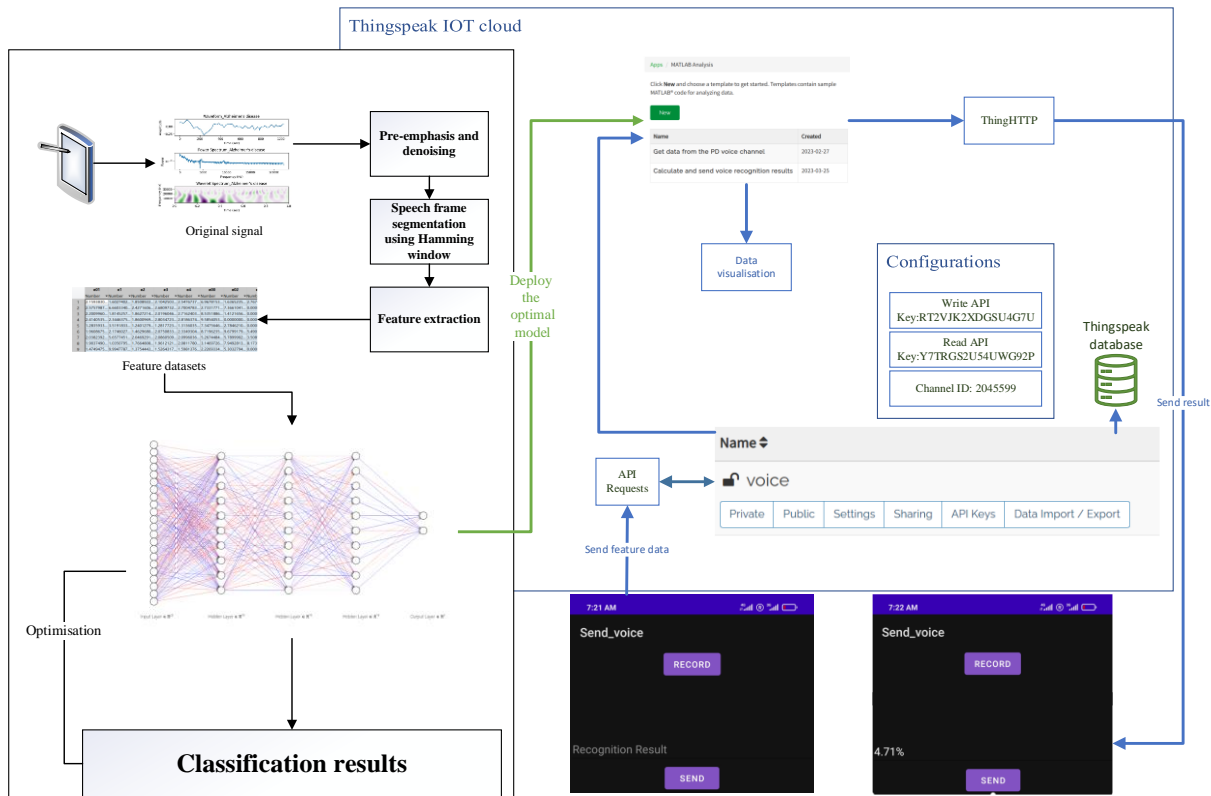


Рис. 6. Результат программирования сети Интернета вещей для ИТ-диагностики

Эксперимент был проведен на международном наборе данных [11]. Результаты тестовых экспериментов в сети ИВ для диагностики БП пациентов по изменению речи приведены в табл. 3.

Таблица 3

**Данные тестовых экспериментов по распознаванию БП по изменению речи**

Набор данных/ показатели	Средняя точность	Средняя чувствительность	Средняя F1 оценка	Точность тестирования
БП по речи	92,95 %	92,95 %	92,95 %	94,7 %

В сети ИВ достигнуто 94,7 % точности при диагностировании болезни Паркинсона на основе речевых данных и показателя F1 92,95 %. На том же наборе данных один из лучших показателей зарубежных исследований составляет 95,8 % [12], что свидетельствует как о хороших результатах распознавания и возможности внедрения сети ИВ для отечественной ИТ-диагностики БП.

**Заключение.** 1. Описан подход, использующий технологии машинного обучения, нейронных сетей, обработки сигналов, сети Интернета вещей (IoT) для раннего выявления болезни Паркинсона. Представлена модель и алгоритмы обработки звуковых сигналов от пациентов, исследуемых на вероятность заболевания болезнью Паркинсона. Сеть Интернета вещей собирает голосовые данные от пациентов с БП, обрабатывает их для устранения шума, извлекает важные характеристики и использует трехуровневую модель FCNN для получения результатов диагностики, основанных на вероятности, предлагая решение для своевременного выявления болезни Паркинсона.

2. Данная работа подчеркивает роль Интернета вещей в развитии ИТ-диагностики пациентов. Благодаря беспроводному подключению устройств сеть IoT не только обеспечивает удаленную диагностику, но и способствует расширению возможностей пациентов, врачей, персонала и повышению качества оказания медицинской помощи. В результате экспериментов на международном наборе данных в сети ИВ достигнуто 94,7 % точности при диагностировании болезни Паркинсона на основе речевых данных.

**THE STRUCTURE OF THE INTERNET OF THINGS NETWORK AND ALGORITHMS FOR THE DIAGNOSIS OF NEUROLOGICAL DISEASE**

U.A. VISHNIAKOU, XIA IWAY

**Abstract**

The purpose of this article is to explore an innovative approach using machine learning technologies, neural networks, signal processing, the Internet of Things (IoT) network for early detection of Parkinson's disease. The model and algorithms for processing audio signals from patients examined for the likelihood of Parkinson's disease are presented. The structure and functions of the Internet of Things network, which uses Thingspeak as a platform, allowing to collect voice data using mobile phones, extract relevant functions from them and process data, are given. As part of this process, a fully connected neural network (FCNN) model is used to calculate the probability of Parkinson's disease, which provides healthcare professionals and patients with a convenient, accurate and early diagnostic IT tool. The study examines the structure, algorithms and role of FCNN in the Internet of Things network, emphasizes its impact on the IT medicine sector.

**Список литературы**

1. Whitehouse, P. J. Ethical issues in early diagnosis and prevention of Alzheimer disease / P. J. Whitehouse // *Dialogues in Clinical Neuroscience*. – 2019. – № 21 (1). – P. 101–108.
2. Giannakopoulou, K. M. Internet of things technologies and machine learning methods for Parkinson's disease diagnosis, monitoring and management: a systematic review / K. M. Giannakopoulou, I. Roussaki, K. Demestichas // *Sensors*. – 2022. – № 22 (5). – 1799 p.
3. Vishniakou, U. A. IT Diagnostics of Parkinson's Disease Based on the Analysis of Voice Markers and Machine Learning / U. A. Vishniakou, X. YiWei // *Doklady BGUIR*. – 2023. – № 21 (3). – 102–110.
4. Upadhyay, N. Speech enhancement using spectral subtraction-type algorithms: A comparison and simulation study / N. Upadhyay, A. Karmakar // *Procedia Computer Science*. – 2015. – № 54. – P. 574–584.
5. Dendrinos, M. Speech enhancement from noise: A regenerative approach / M. Dendrinos, S. Bakamidis, G. Carayannis // *Speech Communication*. – 1991. – № 10 (1). – P. 45–57.
6. Al-Barhan, H. A. Modified speech separation deep learning network based on Hamming window / H. A. Al-Barhan, // In : *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. – 2021. – Vol. 1076 (1).
7. Little, M. Exploiting nonlinear recurrence and fractal scaling properties for voice disorder detection / M. Little [et al.] // *Nature Precedings*. – 2007. – P. 1–11.
8. Pasha, S. ThingSpeak based sensing and monitoring system for IoT with Matlab Analysis / S. Pasha // *International Journal of New Technology and Research (IJNTR)*. – 2016. – № 2 (6). – P. 19–23.
9. Sainath, T. N. Convolutional, long short-term memory, fully connected deep neural networks / T. N. Sainath [et al.] // In: *2015 IEEE international conference on acoustics, speech and signal processing (ICASSP)*. IEEE. – 2015. – P. 1–5.
10. Little, M. Suitability of dysphonia measurements for telemonitoring of Parkinson's disease / M. Little // *Nature Precedings*. – 2008. – P. 1–27.
11. Parkinson Data Set [Electronic resource]. – Mode of access : <https://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/parkinsons>. – Date of access : 12.9.2023.
12. Sakar, B. E. Collection and analysis of a Parkinson speech dataset with multiple types of sound recordings / B. E. Sakar [et al.] // *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*. – 2013. – Vol. 17 (4). – P. 828–834.

DOI: 10.61726/5886.2024.18.97.001

УДК 378

## К ВОПРОСУ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЗАДАННОГО УРОВНЯ ТОЧНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫМИ ПРОЦЕССАМИ

С.Л. ЯБЛОЧНИКОВ<sup>1</sup>, И.О. ЯБЛОЧНИКОВА<sup>1, 2, 3</sup>

<sup>1</sup>Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова,  
Стремянный пер. 36, Москва, 115054, Россия  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2929-8958>

<sup>1</sup>Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова,  
Стремянный пер. 36, Москва, 115054, Россия

<sup>2</sup>Московский технический университет связи и информатики  
ул. Авиамоторная, 8А, Москва, 111024, Россия

<sup>3</sup>Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,  
Малый Толмачевский пер., 8/11, стр. 3, Москва, 101000, Россия  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6685-9729>

Поступила в редакцию 25 ноября 2024

В системах управления реализацией информационных процессов достаточно часто входное и возмущающее воздействия могут быть формализованы в виде функции, которая соответствует возрастающей экспоненте. Функционирование такого рода систем необходимо обеспечить таким образом, чтобы реакция на эти воздействия была адекватной, весьма прогнозируемой. Как правило, данная реакция формируется исходя из критерия минимума некоторой ошибки, в частности, ошибки достижения целевых показателей. Для удовлетворения требований упомянутого выше критерия применяют ряд подходов, одним из которых является обеспечение наличия в системе управления цепи параметрической обратной связи. В частности, на практике такая задача решается интегрированием в систему управления компонента, параметры передаточной функции которого изменяются по определенному закону в зависимости от величины сигнала на входе. Одновременно с этим реализуют ряд процедур, способствующих независимости возникающей ошибки от значений параметров формального описания интегрированного в систему управления компонента, тем самым, в конечном итоге, существенно ее минимизируя. Авторы предложили и обосновали совокупность алгоритмов обеспечения выполнения обозначенных выше условий, а также реализовали оценку точности вынужденного поведения системы управления с дополнительно введенным в нее квазистатическим компонентом.

*Ключевые слова:* информационные процессы, управляющие информационные системы, критерий минимума ошибки, цепь параметрической обратной связи, квазистатический компонент.

**Введение.** В условиях функционирования современного информационного общества взаимоотношения между различными объектами и системами вполне возможно рассматривать как иерархическую совокупность информационных взаимодействий, реализуемых для эффективного осуществления координации действий по достижению множества глобальных и локальных целей. Указанные нами выше системы непрерывно обмениваются друг с другом большими потоками разнородной информации. Такой обмен обусловлен вполне понятным желанием участников этих информационных процессов минимизировать уровень энтропии относительно выбора оптимальных сценариев дальнейшего развития событий. Или же, проще говоря, минимизировать некоторые ошибки осуществления управления, тем самым обеспечивая его эффективность.

В частности, вполне возможно, что при этом реализуется информирование системой, имеющихся в наличии в реальном и виртуальном пространстве окружения некоторых иных систем о возможной корректировке своего целеполагания и (или) вероятного поведения в ближайшей и отдаленной перспективе. В свою очередь, по сути дела, это является взаимным упорядочением действий иерархической совокупности систем с учетом «интересов» друг друга, которое, в некотором смысле, также можно трактовать как синхронизацию совокупности соответствующих процессов.

С другой стороны, с учетом основных положений теории технической кибернетики, указанную выше деятельность можно рассматривать как многомерное иерархическое управление объектами и процессами различной природы (в том числе и информационными), основанное на применении классического метода компенсации возникающих динамических ошибок функционирования систем за счет использования системы (или нескольких систем) обратной связи (аддитивной или аддитивно-параметрической). Эти ошибки, например, могут формироваться вследствие наличия достаточно широкого диапазона вероятных изменений ряда параметров входного сигнала (так называемого задающего воздействия) или же большой совокупности возмущающих воздействий. В конечном итоге большинство возмущающих воздействий может быть интерпретировано исследователем при осуществлении синтеза систем управления как определенные виды входного воздействия. Тем самым фактически минимизируется или оптимизируется палитра применяемых для успешного формального описания процессов управления понятий, алгоритмов и моделей, определяющая его уровень сложности [1, 11, 16, 19].

Весьма интересным и своеобразным образом ведет себя система управления в целом в том случае, если входное (задающее) воздействие может быть адекватно интерпретировано с помощью экспоненциальной или же периодической функций. Именно такая ситуация анализируется авторами в данной статье. В свою очередь, подходы к организации управления многомерными иерархическими системами, основанные на компенсации динамических ошибок были в свое время разработаны рядом отечественных и зарубежных исследователей и представлены в соответствующих публикациях [1–10]. Однако с учетом сегодняшних реалий они требуют соответствующей модернизации и совершенствования.

**Целью данного исследования является** анализ существующих ныне инструментов и методов обеспечения точности управления различными процессами и системами, в том числе и информационными, так называемое «входное воздействие» которых может быть интерпретировано с помощью некоторой возрастающей экспоненциальной функции. При этом критерием эффективности функционирования таких систем управления является минимум ошибки обеспечения достижения цели.

Важной составляющей данного научного исследования является формирование соответствующей теоретической базы для создания и модернизации такого рода инструментов реализации успешного управления системами и процессами, в частности, соответствующих математических моделей и оптимальных алгоритмов.

Методология научного исследования основана на совокупности принципов управления многомерными иерархическими системами, которые в свое время были сформулированы и обоснованы в рамках технической кибернетики.

**Основная часть.** Фактически стандартной процедурой, в рамках упомянутого нами выше подхода к организации оптимального управлению многомерными динамическими иерархическими системами, основанного на применении принципа компенсации динамических ошибок, является представление задающего воздействия (входного сигнала)  $x(t)$  в виде суммы компонентов ряда Тейлора. Однако в ряде публикаций зарубежными исследователями было доказано, что такого рода процедура не всегда способствует адекватной интерпретации задающего воздействия. Это особенно ярко проявляется в случае использования для такой интерпретации лишь достаточно ограниченного количества членов ряда Тейлора. Вследствие этого вся совокупность действий, осуществляемых в рамках данного подхода к управлению, в конечном итоге, оказывается неэффективной.

Таким образом возникла необходимость разрешения упомянутого выше противоречия и, соответственно, успешного обеспечения возможности синтеза и проектирования систем управления. Для обеспечения высокого уровня эффективности комплекса такого рода действий, направленных на создание систем управления, в свое время академиком В. С. Кулебакиным было сформулировано и обосновано следующее предположение, а именно: вынужденная составляющая ошибки минимизируется, стремясь к нулю, если среди полюсов передаточной функции разомкнутой системы  $X(P)$  будут все полюсы задающего сигнала, изображение по Лапласу которого представляет собой следующую дробь,



$$X(p) = \frac{X_1(p)}{(p+\eta)(p-\theta)+\Omega^2}, \quad (1)$$

в наличии абсолютно все полюсы задающего сигнала [7].

По сути дела в таком случае при  $\nu = \Omega = 0$  и  $\eta \neq 0$  оригинал функции, соответствующей задающему (входному) сигналу, может быть представлен выражением (2)

$$K(p) = \frac{1}{p-\nu} \quad (2)$$

и фактически является убывающей экспоненциальной функцией.

В то время как при других значениях параметров формулы (1) это математическое выражение может быть интерпретировано с помощью иных функций, например, возрастающей экспоненциальной функцией, затухающими или незатухающими гармоническими колебаниями, ступенчатой функцией и тому подобное.

На основании приведенного выше предположения, сформулированного В. С. Кулебакиным, а также с учетом совокупности свойств функционирования систем управления с параметрической обратной связью авторами было выдвинуто предположение о том, что вполне возможно при выполнении ряда условий спроектировать систему с фактически минимальной динамической ошибкой при наличии в системе такого рода задающих (входных) сигналов [7, 10, 11]. И это можно реализовать на практике следующим образом. В систему управления необходимо интегрировать дополнительно элементы, численные значения параметров передаточных функций которых соответствуют приведенным ниже условиям.

В частности, в случае реализации на вход системы воздействия, формальное описание которого соответствует убывающей экспоненциальной функции (выполнение условия  $\nu = \Omega = 0$ ), в систему управления дополнительно необходимо интегрировать элемент (блок) с постоянной времени  $T_1 = \frac{1}{\eta}$ . А в случае соответствия формального описания входного воздействия возрастающей экспоненциальной функции – аperiодическое звено с постоянной времени  $T_1 = \frac{1}{\nu}$ .

Если же задающее (входное) воздействие является некоторым гармоническим сигналом с частотой  $\Omega$ , то необходимо обеспечить наличие в структуре системы управления колебательного звена с нулевым затуханием и собственной резонансной частотой колебаний  $\omega_0 = \Omega$ . В иных случаях вполне эффективным будет интегрирование в структуру системы управления аналогичных элементов. Таким образом фактически могут быть реализованы своеобразные компенсационные действия по отношению к задающим сигналам любого вида.

Следовательно, компенсация в соответствии с вышеуказанными принципами возникающей при функционировании системы управления ошибки, которая обусловлена, фактически, некоторой вариативностью параметров  $\Omega$ ,  $\eta$ ,  $\nu$  задающего воздействия, может быть на практике реализована следующими тремя способами:

- путем синтеза комбинированных следящих систем, у которых в их структуре в наличии дополнительная обратная связь по задающему воздействию;
- проектированием следящих систем, в которых предусмотрена самонастройка с учетом параметров задающего (входного) сигнала;
- интегрированием в структуру системы нескольких последовательных нелинейных корректирующих блоков, каждый из совокупности которых ориентирован на отслеживание отдельной специфической ситуации.

Для реализации двух первых способов осуществления компенсации, возникающих в системе управления ошибок, необходимо определенным образом оценить (определить) совокупность параметров задающего (входного) воздействия. На практике это осуществляется, как правило, путем формирования дополнительных компонентов (цепей и блоков) в системе управления. Целью функционирования таких дополнительных элементов (в самом простом случае – дифференцирующих блоков) системы является адекватное определение ряда производных задающего воздействия. Однако такого рода действия могут привести к снижению уровня помехоустойчивости системы управления. Третий же способ, из совокупности перечисленных нами выше, ориентирован на использование для принятия управленческого решения соответствующей информации об ошибке регулирования. В данном случае такая ошибка, в первую очередь, формируется в системе вследствие не совсем эффективной реализации контроля параметров задающего воздействия.

Как свидетельствует анализ научно-технической литературы, на практике успешно применяются все три упомянутых способа компенсации ошибок, возникающих при работе систем управления [1–12, 15–18]. Однако в рамках данного исследования авторы предпочли ориентироваться именно на третий способ с учетом его ряда особенностей, которые будут представлены ниже по тексту данной статьи. В частности, нами был рассмотрен вариант, основанный на интеграции в систему управления некоторого корректирующего устройства, параметры передаточной функции которого определенным образом коррелировали бы не с параметрами входного воздействия, а с параметрами сигнала рассогласования, формируемого в системе с обратной связью.

В частности, такая система управления может быть синтезирована путем формирования цепи параметрической или аддитивно-параметрической обратной связи. Параметры блоков, входящих в такую цепь специфической обратной связи и, соответственно, коэффициенты их передаточных функций должны коррелировать с параметрами самого входного сигнала и ряда его производных, как это предусмотрено первыми двумя способами компенсации возникающих в системах управления ошибок, представленных нами выше. Таким образом фактически авторы предлагают собственный комплексный подход к минимизации ошибок управления [13–15].

Продемонстрируем подобную реализацию процессов в системе управления в случае, если входной сигнал задан в виде возрастающей экспоненты, а именно:  $X(t) = e^{\nu_0 t}$ .

Для воспроизведения данного сигнала с минимальной ошибкой, исходя из формулы (1), необходимо интегрировать в прямую цепь системы блок, передаточная функция которого соответствует (2), т. е.  $K(p) = \frac{1}{p-\nu}$ .

Для того, чтобы система управления воспроизводила входной сигнал с минимальной ошибкой согласно правилам, приведенными нами выше, необходимо, чтобы система управления интерпретировала входной сигнал с минимальной ошибкой при любых  $\nu_0$ , необходимо в формуле (2) обеспечить вариативность параметра  $\nu$ , в частности, возможность обеспечения выполнения условия (3).

$$\nu = \nu_0. \quad (3)$$

В случае невыполнения указанного нами выше условия (3) в системе управления будет формироваться ошибка  $\varepsilon_0$ , которая, по сути дела, будет являться некоторой функцией с аргументом  $\nu$ .

Для успешного решения задачи, связанной с минимизацией величины данной ошибки, необходимо обеспечить непрерывную адаптивность параметров интегрированного в систему управления компонента, и, соответственно, параметров его передаточной функции. Выполнение данного условия может быть реализовано, например, за счет применения цепи параметрической обратной связи по коэффициенту передачи. Компоненты подсистемы такой параметрической обратной связи должны быть включены последовательно в цепь формирования ошибки регулирования.

Уравнение (4), отображающее взаимосвязь выходного сигнала  $Y$  и ошибки может быть представлено следующим образом:

$$\frac{dy}{dt} - \nu_{in} y = k_m \varepsilon, \quad (4)$$

где  $\nu_{in} = \nu_0 (1 + k_1 \varepsilon)$ .

При различных значениях  $\nu_0$  показатель экспоненциальной функции, в формуле соответствующей входному сигналу в виде возрастающей экспоненты, будет величиной постоянной, поэтому от формулы (4) можно вполне перейти к уравнению передаточной функции для системы контроля величины ошибки (5)

$$K(p) = \frac{Y(p)}{\varepsilon(p)} = \frac{k_m}{p - \nu_0 (1 + k_1 \varepsilon)}, \quad (5)$$

Таким образом, если показатель приведенной нами выше экспоненциальной функции, соответствующей входному сигналу системы, равен  $\nu = \nu_0$ , то ошибка (рассогласование) минимальна (фактически равна нулю) и уравнения (5) и (2) являются, по сути дела, эквивалентными. И наоборот, если  $\nu \neq \nu_0$ , то формируется ошибка  $\varepsilon$  (рассогласование), которая будет способствовать возрастанию или же убыванию  $\nu_0$  (в зависимости от знака ошибки  $\varepsilon$ ) в соответствии с формулой (5).

Данная система может быть нами определена как система с параметрической обратной связью, которая содержит квазистабильный блок, работа которого ориентирование на выполнение условий

минимизации возникающей ошибки, а формализация функционирования может быть представлена в виде уравнения (6).

$$T_{QSB} \frac{du}{dt} - u = k_n u, \quad (6)$$

где  $T_{QSB}$  – временной параметр такого квазистабильного компонента (блока) в системе управления,  $u$  – сигнал об ошибке  $\varepsilon$ , поступающий на вход соответствующей цепи параметрической обратной связи,  $k_n$  – статический коэффициент передачи цепи, содержащей квазистатический блок.

Однако в этом случае могут возникать следующие проблемы. Во-первых, необходимо осуществить исследование системы управления при условии, что в ее структуре априори присутствуют нестабильные звенья. Во-вторых, необходимо достаточно тщательно определить (оценить и выбрать) параметры блоков подсистемы положительной обратной связи, которые отвечали бы вышеуказанным требованиям.

Далее рассмотрим частный случай применения подсистемы параметрической или аддитивно-параметрической обратной связи, которая вводится в систему управления с целью обеспечения некоторого минимума ошибки регулирования и сведения ее практически к нулю. Ниже по тексту статьи представлена информация относительно реализации попытки оптимальной настройки квазистатического звена как компонента адаптивной системы управления.

Как мы обозначили выше по тексту статьи, условием точной интерпретации некоторого входного воздействия по отношению к системе управления, которое с формальной точки зрения может быть представлено в виде некоторой экспоненциальной функции, является равенство постоянных времени самого входного воздействия и некоторого квазистабильного апериодического блока, который дополнительно вводится в структуру системы. Поскольку указанное выше значение постоянной времени может изменяться в процессе работы системы управления, необходимо непрерывно корректировать значение постоянной времени апериодического звена таким образом, чтобы обеспечить выполнение указанного условия равенства. Мы предполагаем, что именно соблюдение этого требования позволит нам свести к минимуму динамическую погрешность.

Таким образом, адекватным критерием для эффективной настройки параметров квазистатического блока как неотъемлемой части системы управления является отклонение величины динамической ошибки от нулевого значения. Поэтому вполне логичным является требование относительно того, чтобы постоянная времени упомянутого выше квазистатического блока  $T_{QSB}$  коррелировала с абсолютной величиной динамической ошибки (в самом простейшем случае являлась ее некоторой алгебраической функцией).

А если быть точным, то необходимо, чтобы постоянная времени данного блока (компонента) приобретала приращение  $\pm \Delta T_{QSB}$ , абсолютная величина и знак которого определенным образом соответствовали бы абсолютной величине и знаку динамической ошибки  $\pm \Delta \varepsilon_0$ .

Как следует из ряда научных публикаций по технической кибернетике, апериодический компонент системы управления, содержащий подсистему параметрической обратной связи, адекватно характеризуется совокупностью параметров передаточной функции, числовые значения которых зависят от величины и знака входного сигнала. В данном случае такого рода зависимость формируется от величины и знака сигнала рассогласования  $\varepsilon_0$ . Действительно, в случае наличия контура линейной обратной связи относительно апериодического звена по коэффициенту передачи, мы получим уравнения следующего вида. В частности, для прямой цепи:

$$T_{QSB} \frac{du}{dt} - u = k_n u_1, \quad (7)$$

где  $T_{QSB}$  – постоянная времени квазистатического блока;  $u(t)$  – выходной параметр прямой цепи системы управления;  $u_1(t)$  – входной сигнал апериодического блока;  $k_n$  – статический коэффициент передачи апериодического блока.

Для успешного осуществления формального описания функционирования так называемого блока замыкания цепи параметрической обратной связи справедливо следующее выражение (8):

$$u_1(t) = (k_m + k_l x_l(t)) \varepsilon, \quad (8)$$

где  $k_m$  и  $k_l$  – соответствующие параметры компаратора, реализующего сравнение величины динамической погрешности  $\varepsilon$  и сигнала  $x_l(t)$ , который формируется на выходе блока цепи обратной связи относительно апериодического блока.

В свою очередь, для контура обратной связи относительно апериодического блока справедливо уравнение (9):

$$x_I(t) = k_0 u(t), \quad (9)$$

где  $k_0$  – коэффициент передачи для контура обратной связи относительно апериодического блока.

Таким образом, общее уравнение системы, которая содержит апериодический блок с цепью положительной обратной связи принимает вид (10):

$$T_{ekv} \frac{du}{dt} - u = k_{ekv} u_1, \quad (10)$$

где

$$T_{ekv} = \frac{T_1}{1 + k_1 k_0 k_n \varepsilon}, \quad (11)$$

$$k_{ekv} = \frac{k_n k_m}{1 + k_1 k_0 k_n \varepsilon}, \quad (12)$$

соответственно, эквивалентная постоянная времени и эквивалентный коэффициент передачи.

При  $\varepsilon = 0$  уравнение квазистатического звена с адаптивной постоянной времени должно соответствовать уравнению (6). Следовательно необходимо принять следующее условие  $k_m = 1$ .

В зависимости от абсолютной величины и знака ошибки  $\varepsilon$  будет изменяться также и постоянная времени  $T_{ekv}$ . Варьируя коэффициенты  $k_1$  и  $k_0$  вполне можно достигнуть необходимого соотношения между вариациями  $\varepsilon$  и  $T_{ekv}$ . Одновременно с изменением постоянной времени  $T_{ekv}$  реализуется пропорциональное изменение и соответствующего коэффициента передачи  $k_{ekv}$ . Это приводит к тому, что корни характеристического уравнения в процессе регулирования системы управления изменяются весьма незначительно. Поэтому показатели качества переходного процесса, фактически, остаются неизменными. Кроме того, эффективная полоса пропускания сигналов также не изменяется. Указанные выше обстоятельства позволяют обеспечивать оптимальные уровни параметров системы управления в целом.

Синтезированная авторами система, предусматривающая некоторую адаптацию параметров квазистатического звена, является достаточно устойчивой и ее параметры почти статическими. Это определяется наличием того условия, что дополнительная информация относительно величин параметров системы управления может быть получена только лишь при величине ошибки отличной от нуля.

**Заключение.** Материал, представленный в данной научной статье, основан на совокупности фундаментальных подходов в рамках технической кибернетики, и, следовательно, вполне может быть использован для успешного синтеза систем управления сложными техническими и технологическими объектами и процессами, в том числе и информационными. Однако практическое применение вышеприведенных идей не ограничивается техническими или технологическими областями. Они могут быть использованы и во многих других областях.

Это связано с тем, что принцип реализации обратной связи является мощным и универсальным инструментом для успешного внедрения эффективного управления на научной основе информационными процессами и в экономике, и в биологии, и в социальной сфере, и во многих других отраслях. Во всех вышеперечисленных случаях объектами управления являются сложные, многомерные, иерархические динамические системы, обладающие свойством адаптации [8–10, 15–20].

Успешное достижение совокупности глобальных и локальных целей функционирования таких многомерных систем невозможно без формирования и реализации многочисленных обратных связей (как положительных, так и отрицательных, а также как аддитивных, так и параметрических). На сегодняшний день это является неоспоримым фактом. В данной авторами рассмотрены отдельные случаи реализации адаптивного управления, ориентированного на обеспечение соблюдения критерия минимума ошибок, возникающих при работе сложных систем различной природы, в том числе и информационных. Использование дополнительных компонентов, которые «сжимают» в определенном смысле ошибки, возникающие при работе систем, на практике оказывается очень продуктивным. В дальнейшем в ряде своих публикаций авторы данной статьи планируют конкретизировать набор практических инструментов для реализации такого управления в различных сферах, в том числе и тех, которые не связаны с техникой и технологиями.

## ON THE ISSUE OF ENSURING A GIVEN LEVEL OF ACCURACY IN INFORMATION PROCESS MANAGEMENT

S.L. YABLOCHNIKOV, I.O. YABLOCHNIKOVA

### Abstract

In control systems for the implementation of information processes, quite often the input and disturbing effects can be formalized in the form of a function that corresponds to an increasing exponential. The functioning of such systems must be ensured in such a way that the response to these impacts is adequate and highly predictable. As a rule, this reaction is formed based on the criterion of the minimum of some error. To meet the requirements of the above-mentioned criterion, a number of approaches are used, one of which is to ensure the presence of a parametric feedback circuit in the control system. In particular, in practice, such a task is solved by integrating a component into the control system, the parameters of the transfer function of which change according to a certain law depending on the magnitude of the input signal. At the same time, a number of procedures are implemented that contribute to the independence of the error that occurs from the values of the parameters of the formal description of the component integrated into the control system, thereby, ultimately, significantly minimizing it. The authors proposed and justified a set of algorithms to ensure the fulfillment of the above conditions, and also implemented an assessment of the accuracy of the forced behavior of the control system with an additional quasi-static component introduced into it.

### Список литературы

1. Lilburne, L. Improving Understanding and Management of Uncertainty in Science-Informed Collaborative Policy Processes / L. Lilburne, M. Robson-Williams, N. Norton // *Sustainability*. – 2022. – Vol. 14. – P. 6041.
2. Щербатов, И. А. Интеллектуальное управление робототехническими системами в условиях неопределенности / И. А. Щербатов // *Вестник Астраханского государственного технического университета. Сер. Управление, компьютерные науки и информатика*, 2010. – № 1. – С. 73–77.
3. Stoelsnes, R. R. Uncertainty Management of General Conditions in a Project / R. R. Stoelsnes, R. G. Bea // *Risk Management*. – 2005. – Vol. 7, № 2. – P. 19–35.
4. Bhuiyan, N. A Framework for NPD Processes Under Uncertainty / N. Bhuiyan, V. Thomson // *Engineering Management Journal*. – 2022. – Vol. 2. – P. 27–35.
5. Jeang, A. Robust product design and process planning in using process capability analysis / A. Jeang // *J Intell Manuf*. – 2015. – Vol. 26. – P. 459–470.
6. Sibalija, T. V. An integrated approach to optimise parameter design of multi-response processes based on Taguchi method and artificial intelligence / T. V. Sibalija, V. D. Majstorovic // *Journal of Intelligent Manufacturing*. – 2012. – Vol. 23, № 5. – P. 1511–1528.
7. Кулебакин, В. С. Об оптимальной линеаризации нелинейного объекта регулирования с неизвестными параметрами линейной системой с постоянными параметрами при отсутствии помех / В. С. Кулебакин, Ж. Б. Линковский // *Докл. АН СССР*. – 1964. – № 159 (3). – С. 525–527.
8. Artemyev, V. S. Implementation of Adaptive Control with Parametric Uncertainty / V. S. Artemyev [et al.] // *2022 Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex (TIRVED)*, Moscow, Russian Federation. – 2022. – P. 1–7.
9. Kuptsov, M. I. On the Stability of Integral Manifolds of a System of Ordinary Differential Equations in the Critical Case / M. I. Kuptsov [et al.] // *J Math Sci*. – 2022. – № 262. – P. 825–834.
10. Yablochnikov, S. L. On the Issue of Synchronization of Real and Virtual Processes in the Context of the Evolution of the Modern Information Society / S. L. Yablochnikov [et al.] // *2021 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*. – 2021. – P. 1–6.
11. Mokra, N. V. Intensification of Intelligent Automated Control Systems / N. V. Mokra [et al.] // *2023 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*, Moscow, Russian Federation. – 2023. – P. 1–6.
12. Yablochnikov, S. L. To the Question of Synchronization of the Processes of Functioning of the Components of the Socio-Economic Sphere / S. L. Yablochnikov [et al.] // *2019 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*, Russia. – 2019. – P. 1–11.
13. Белозеров, В. В. Автоматизация создания систем управления опасными производственными объектами / В. В. Белозеров // *Электроника и электротехника*. – 2017. – № 2. – С. 27–42.

14. Мусаев, А. А. Интеграция автоматизированных систем управления крупными промышленными предприятиями: принципы, проблемы, решения / А. А. Мусаев, Ю. М. Шерстюк // Автоматизация в промышленности. – 2003. – №10. – С. 40–45.
15. Payne, H. J. Models of Freeway Traffic and Control / H. J. Payne // *Mathematical Models of Public Systems*. – 1971. – Vol. 1. – P. 51–61.
16. Яблочников, С. Л. К вопросу обеспечения точности управления телекоммуникационными системами / С. Л. Яблочников, И. О. Яблочникова // *Современные средства связи: материалы XXIX Междунар. науч.-техн. конф., 31 окт. – 1 нояб. 2024 г.* / Бел. гос. акад. Связи ; редкол.: А. О. Зеневич [и др.]. – Минск, 2024. – С. 368–371.
17. Pochekaeva, O. Socio-economic, Legal and Informational Aspects of the Implementation of Management in the Transport Sector / O. Pochekaeva [et al.] // *International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia*. – 2021. – P. 726–735.
18. Yablochnikova, I. O. Ensuring a Given Level of Control Accuracy for Systems of Various Nature / I. O. Yablochnikova [et al.] // *2024 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*, Vyborg, Russian Federation. – 2024. – P. 1–5.
19. Yablochnikov, S. L. Aspects of Assessing the Absolute Stability of Control Systems Containing Nonlinear Components / S. L. Yablochnikov [et al.] // *2024 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*, Vyborg, Russian Federation. – 2024. – P. 1–6.
20. Yablochnikov, S. L. The Aspects of Modeling Information Processes Realized in Complex Telecommunication Systems / S. L. Yablochnikov [et al.] // *2018 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*, St. Petersburg. – 2018. – P. 1–5.

**КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ**

УДК 004.056.5

**СИСТЕМНАЯ ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ ОТ УТЕЧКИ ПО ТЕХНИЧЕСКИМ КАНАЛАМ**

В.К. ЖЕЛЕЗНЯК<sup>1</sup>, К.Я. РАХАНОВ<sup>1</sup>, С.В. ЛАВРОВ<sup>1</sup>, А.Г. ФИЛИППОВИЧ<sup>2</sup>,  
М.М. БАРАНОВСКИЙ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Учреждение образования «Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой»,  
ул. Блохина, 29, Новополоцк, 211440, Беларусь

<sup>2</sup>Оперативно-аналитический центр при Президенте Республики Беларусь»,  
ул. Кирова, 49, Минск, 220030, Республика Беларусь

В процессе функционирования информационной системы (ИС) могут возникать поля различной физической природы, токи и напряжения в различных физических цепях, несущие важную информацию, циркулирующую в системе.

Сосредоточенными и распределенными элементами информационной системы во взаимодействии с окружающей средой образуются каналы утечки информации (КУИ), которые исследуются с учетом свойств и характеристик сообщений, сигналов, самой системы и окружающей среды.

Сообщение – это форма представления информации для ее передачи, хранения, обработки или непосредственного использования. Сигнал – это изменяющаяся физическая величина, однозначно отображающая сообщение. В информационной системе сведения, содержащие информацию, составляют сообщение, которое преобразуется в сигналы.

Эффективность любой ИС оценивается совокупностью показателей, а если возможно, то обобщенным показателем, определяемым старшей системой. Одним из важных показателей является показатель безопасности информации. Этот показатель может определяться совокупностью частных показателей, в том числе и показателями защиты информации от утечки по техническим каналам различной физической природы.

В процессе моделирования КУИ и его элементов необходимо ввести частные и обобщенные показатели, характеризующие утечку информации из системы и эффективность защиты информации для различных физических каналов. При формировании обобщенного показателя следует выбирать существенные показатели (параметры), которые непротиворечивы и однозначно оцениваются (измеряются). Обобщенный показатель защиты информации (ЗИ) должен, как правило, включать вероятностные, информационные и экономические показатели и определять меру защищенности информации при заданных ресурсах [1].

Показатель защищенности информации – обобщенная положительная характеристика, отвечающая требованиям надсистемы и определяемая совокупностью основных положительных (с позиции надсистемы) свойств системы защиты информации. Методика оценки эффективности защиты информации от утечки по техническим КУИ на основе расчета обобщенного показателя представлена в [2, 3].

Целью ЗИ является исключение либо существенное затруднение получения информации несанкционированным получателем. Для решения задачи защиты информации необходимо иметь или получать сведения о параметрах информационных физических полей различной природы, о параметрах наведенных сигналов на неинформационные цепи и использовать весь комплекс возможных мер защиты от извлечения информации в различных точках пространства за пределами контролируемой зоны. Подсистема измерений и контроля должна обеспечивать оценку параметров полей и сигналов с достаточной точностью. Методы оценки параметров, определяющих утечку и защиту информации, должны обеспечивать повторяемость и воспроизводимость результатов. Контроль принимаемых мер защиты информации от утечки по техническим каналам в процессе эксплуатации информационной системы с целью обеспечения предъявляемых требований осуществляется с учетом влияния различных факторов внешней среды и режимов функционирования ИС. Своевременность, достоверность и действенность (конечная результативность) контроля за эффективностью принятых мер ЗИ зависит от методики и средств измерения, условий измерения,

объема (времени) выборки, быстродействия обработки, требуемой периодичности измерений, нормативных параметров и др. Особенно следует обращать внимание на быстродействие измерений и обработки результатов при получении достаточного статистического материала за заданное время, что повышает верность принятия решения. Автоматизация всех процессов включает программное управление измерениями, сбором данных об информационных полях от первичных преобразователей, обработкой смеси сигнала и помех в темпе их поступления (в реальном масштабе времени) с целью выделения слабых сигналов и оценки параметров сигналов и помех в КУИ, а также вычислительным процессом выделения всей необходимой информации, ее воспроизведением, отображением и документированием.

Эффективность защиты информации контролируют в условиях сложной помеховой обстановки, так как контролируемые параметры меньше уровня непреднамеренных (фоновых) либо маскирующих (специально организованных) помех.

Следует подчеркнуть, что реальную оценку эффективности мер ЗИ в КУИ желательно проводить в реальном масштабе времени на основе автоматизации всех процессов измерений и анализа параметров различных сигналов с требуемой точностью и достоверностью.

Теория и практика защиты информации развивалась в рамках теории и техники связи для обеспечения безопасности информации в линиях и каналах связи и затем распространилась на побочные технические каналы утечки, где стоит задача защиты информации при низких соотношениях сигнал/помеха в условиях различных методов оптимального приема и обработки разведывательным приемником. Современные достижения в области защиты информации позволяют по праву отнести ее к научному направлению теории информатики.

Систематизация знаний по научной проблеме защиты информации от утечки по техническим каналам, обобщение теоретических и технических решений дает возможность сформулировать сущность предметной области ЗИ, которая включает:

- исследование побочных физических явлений паразитной генерации и излучения информационных полей различной физической природы в процессе взаимодействия информационной системы и внешней среды;
- распространение и взаимное преобразование в различных физических средах, образование токов и напряжений в результате воздействия полей на различные информационные и неинформационные цепи, связанные с цепями, уходящими за пределы ограниченного пространства (в частности, контролируемых зон), а также преобразований токов и напряжений на неинформационных цепях в поля, исследование рассеивания физических полей, их распространение до разведывательного приемника; эти поля, токи и напряжения могут нести признаковую (об объекте) и семантическую информацию при наличии физической доступности в точке перехвата;
- исследование процессов линейных и нелинейных преобразований полей и сигналов на элементах информационной системы и окружающей среды, их взаимных преобразований и взаимодействий с другими полями (ВЧ-полями, ВЧ-навязывание, лазерное облучение и др.);
- исследование и решение комплекса вопросов по обоснованию нормативных параметров и характеристик КУИ, сигналов и помех в них и методов их измерений и автоматизированного контроля;
- разработка методологических основ исследования ЗИ в КУИ, в частности разработка методов оценки эффективности мероприятий по защите информации в КУИ;
- исследование и разработка различных способов и средств ЗИ, а также путей перевода исследуемой информационной системы в желаемое состояние (с отсутствием или ограничением КУИ) на основе оптимизированных алгоритмов измерений, контроля и управления;
- исследование условий реализации оптимальных методов ЗИ, развитие методов и средств оптимизированного, автоматического, оперативного, достоверного и действенного контроля мер защиты КУИ и их параметров;
- теоретическое обобщение, систематизирование научных знаний и прогнозирование путей защиты информации в КУИ различных информационных систем.

Основы защиты информации техническими методами включают:

- анализ информационных процессов в ИС, включая поиск, сбор, накопление, обработку и представление информации, определение и формирование параметров и характеристик информационного пространства, содержащих сведения и данные об объекте защиты, анализ и оценку характеристик среды распространения различных физических полей, аномальность физических полей, обусловленных неоднородностями;



- анализ и оценку возможности несанкционированного доступа к ИС внутри и вне контролируемой зоны с учетом особенностей объекта и характеристик возможных КУИ;
- установление КУИ путем получения сведений о параметрах информационных охраняемых сигналов об объекте (признаков) и сигналов, несущих семантическую информацию, посредством извлечения этих сигналов из информационных полей различной физической природы;
- установление КУИ, получаемых за счет наводок сигналов на неинформационные цепи, уводящие за пределы контролируемого пространства, оценки их параметров и выделения смысловой информации;
- разрушение КУИ маскированием сигналов и путем их искажения с целью скрытия факта, места, времени и содержания, внесения элементов дезинформации и имитации в возможных КУИ;
- классификация и модели возможных систем и средств перехвата сигналов и полей различной физической природы и способов и средств обработки сигналов в условиях низких отношений сигнал/помеха.

Способы реализации защиты информации и конкретные меры по ЗИ основываются:

- на ослаблении информационных физических полей рассеивания, их наводок на неинформационные цепи, на источники излучения ВЧ-колебаний;
- ослаблении взаимных преобразований информационных полей и их переизлучений и наводок на неинформационные цепи;
- срыве паразитных генераций, переносчиков информации;
- ослаблении паразитных модулированных ВЧ-колебаний;
- локализации источников информационных полей рассеивания;
- локализации внешних ВЧ-колебаний, распространяющихся в виде физических полей по неинформационным цепям и наводящихся на информационные цепи;
- предотвращении параметрической модуляции внешних остронаправленных физических полей сигналами и их переизлучением;
- локализации излучений полей рассеивания сигналов с целью ослабления взаимодействия с системами их обнаружения и перехвата;
- разрушении КУИ с обеспечением скрытности функционирования информационных систем;
- формировании информационных параметров сигналов и маскируемых помех, максимально затрудняющих перехват и обработку информации (в том числе кодовое зашумление);
- оценке обстановки и условий использования информационной системы и ее взаимодействия с другими системами;
- оценке ограничивающих факторов и связей между источником информации и средством обнаружения и перехвата;
- оценке и контроле параметров, определяющих степень ЗИ (аппаратурными, программными методами);
- на автоматизированном контроле защищаемых параметров.

К примеру, акустический речевой сигнал (АРС) генерируется органами человека, воспринимается его органами чувств, а также воспроизводящей и регистрирующей технической системой, относится к биологическим сигналам и является первичным. В речевых сигналах заключена содержательная и структурная информация (лингвистическая или синтаксическая). Согласно первому подходу производятся измерения характеристик, существенных свойств (признаков), формируемых в вектор признаков.

Учитывая специфику распространения акустических колебаний, канал утечки речевой информации может быть:

- воздушным, обусловленным распространением речевого сигнала в воздушной среде;
- виброакустическим, обусловленным преобразованием речевого сигнала воздушной среды в колебания твердой среды и обратным преобразованием;
- микросейсмическим, обусловленным преобразованием акустических речевых сигналов воздушной среды в микроколебания земной поверхности;
- электроакустическим, обусловленным преобразованием акустических речевых колебаний воздушной среды в электрические сигналы (микрофонный эффект) и обратным преобразованием.

Для речевых сигналов критерием защищенности следует считать установленную величину разборчивости речи на выходе КУИ.

Факторами, учитываемыми при анализе защищенности акустических речевых сигналов, следует считать неравномерность спектральной плотности речевого сигнала, предельную биноуральную чувствительность уха в диапазоне речевого сигнала, затухание в элементах ограждающих конструкций, спектральную плотность фонового акустического шума, исключая искусственные акустические шумы и реверберационные помехи.

Кроме того, разборчивость речи определяется отношением сигнала/шума (ССШ) к ширине полосы речевого сигнала. Причем ССШ определяется на многих частотах для того, чтобы максимально учесть факторы, влияющие на величину разборчивости речи. Сужение полосы речевого сигнала снижает разборчивость речи.

На ФГУП «Информакустика» разработана и прошла все испытания новая аппаратура автоматизированного технического контроля каналов утечки речевой информации ТРАП-Н-50.

#### Список литературы

1. Безопасность информации в телекоммуникационных системах : сборник статей / под ред. засл. деятеля науки и техники РФ проф. В.Ф. Комаровича. – СПб. : ВУС, 2001. – 120 с.
2. Железняк, В. К. Защита информации от утечки по техническим каналам: учебное пособие / В. К. Железняк. – СПб. : ГУАП, 2006. – 188 с.
3. Филиппович, А. Г. Идентификация закладных устройств / А. Г. Филиппович, Г. А. Филиппович, А. Ю. Бушуев. – Минск : Издательский центр ВГУ, 2024. – 194 с.

УДК 004.722:535

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОПОЛОГИИ FSON С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛГОРИТМА ДЕЙКСТРЫ

Ш.А. СУЛТАНОВА<sup>1</sup>, Э.Ш. ПАЙЫЗОВ<sup>1</sup>, Т.К. РАСУЛЛУ<sup>1</sup>, Н.И. ДЖАМАЛЗАДЕ<sup>1</sup>, Д.С. НАМАЗОВ<sup>1</sup>,  
Р.П. ИСМАИЛОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Учреждение образования «Азербайджанский Технический Университет»,  
пр. Г. Джавида, 25, Баку, AZ 1073, Азербайджан

Сети оптической связи через свободное пространство (FSON) имеют несколько ключевых преимуществ, которые делают их эффективным решением для передачи данных на большие расстояния. Среди главных преимуществ можно выделить:

- высокая скорость передачи данных, поскольку FSON использует лазеры для передачи информации, что исключает необходимость использования проводных линий;
- гибкость развертывания, поскольку не требуется физическая инфраструктура, что значительно снижает затраты;
- безопасность передачи, так как лазерные лучи направлены на конкретные цели, что затрудняет перехват данных;
- устойчивость к электромагнитным помехам, что важно при организации связи в условиях космической и наземной инфраструктуры.

Научные исследования подтверждают, что FSON активно применяется в космических коммуникациях, среди спутников на низкой околоземной орбите (LEO), для связи между зданиями с прямой видимостью, а также в ряде других сфер [1]. Учитывая эти особенности, FSON поддерживает множество топологий для различных применений.

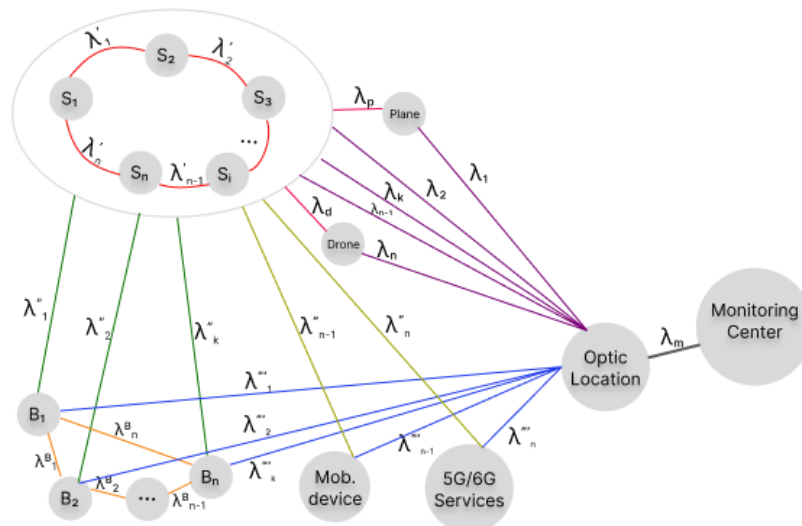


Рис. 1. Топология сети FSON с узлами и длинами волн

На рис. 1 представлена схема одной из таких топологий, основанная на теории графов [2, 3]. Как видно из рисунка, сеть FSON организует коммуникацию между мониторинговым центром, оптическим локатором, спутниками на низкой орбите, самолетом, дроном и зданиями, имеющими прямую видимость. Для обеспечения надежной связи между всеми элементами системы используются разные длины волн, что позволяет минимизировать помехи и повысить пропускную способность. В частности, для связи между оптическим локатором и спутниками применяются длины волн  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n, \lambda_d, \lambda_p$ , между спутниками и зданиями  $\lambda''_1, \dots, \lambda''_n$ , между зданиями  $\lambda^B_1, \dots, \lambda^B_n$ , между оптическим локатором и зданиями  $\lambda'''_1, \dots, \lambda'''_n$ , между мониторинговым

центром и оптическим локатором  $\lambda'_m$ . Эти длины волн обеспечивают независимую передачу данных между узлами.

Для эффективного расчета времени передачи данных между узлами сети используется следующая формула:

$$T_t = \sum_{i=1}^n \left( \frac{d_i}{S_i} + \delta_i \right), \quad (1)$$

где  $T_t$  – общее время передачи данных между двумя узлами,  $d_i$  – расстояние между узлом  $i$  и узлом  $i + 1$ ,  $S_i$  – скорость передачи данных на данном участке сети,  $\delta_i$  – задержка обработки данных на узле  $i$ .

Эта формула используется для расчета общего времени передачи данных между узлами с учетом расстояния, скорости передачи и возможных задержек на каждом этапе. Таким образом, она помогает вычислить точное время, необходимое для передачи данных в сети FSON.

С использованием теории графов была построена модель сети, где узлы (здания, спутники, дроны) представлены как вершины, а связи между ними – как ребра с весами, зависящими от расстояний, скорости и задержек. Для расчета кратчайшего пути между узлами используется алгоритм Дейкстры, который находит оптимальный маршрут, минимизируя задержки и затраты на передачу данных.

Таблица минимальных путей, созданная на основе графов, хранится в мониторинговом центре и используется для автоматической маршрутизации данных. При обрыве связи система пересчитывает маршруты и использует альтернативные пути. Алгоритм автоматически адаптируется к изменениям в сети, обновляя таблицу при добавлении или удалении узлов, что обеспечивает надежность и устойчивость сети.

Использование FSON вместе с алгоритмом Дейкстры обеспечивает не только высокую скорость и безопасность передачи данных, но и возможность автоматической оптимизации маршрутов в реальном времени. Построенная модель и разработанная система обеспечивают адаптацию к изменениям в топологии сети, минимизируя время передачи данных и обеспечивая надежную работу сети даже при возможных сбоях.

#### Список литературы

1. Hasanov, M. H. FSON Topology for Mass Development and Management of Future Generation Space Technologies. Elsevier / M. H. Hasanov [et al.] // Procedia Computer Science. – 2023. – № 230. – P. 82–89.
2. Дейкстра, Э. В. Решение задачи о кратчайшем пути в графе / Э. В. Дейкстра / Numerische Mathematik. – 1959. – Т. 1. – С. 269–271.
3. Калиги, М. А. Обзор оптической связи через свободное пространство: коммуникационная теория / М. А. Калиги, М. Уйсал // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2014. – Т. 16, № 4. – С. 2231–2258.