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, 2023 г., № 2 (18)

30 лет Белорусской государственной академии связи

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, Л.Л. Гладков, И.Р. Гулаков, Г.Е. Кобринский, И.А. Михайлова-Станюта, В.В. Соловьев, В.М. Сурин, В.К. Конопелько, Е.В. Василиу, Л.М. Лыньков, Т.В. Борботько, Т.М. Мансуров, В.О. Чернышов, Л.И. Гречихин, В.Б. Толубко, А.И. Семенко, 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

ТЕХНОЛОГИИ СВЯЗИ

Зеневич А.О., Новиков Е.В., Матковская Т.А., Василевский Г.В., Толкачёв О.А. Использование макроизгиба оптического волокна для разделения потоков оптических сигналов с различной длиной волны 5

ЦИФРОВАЯ СВЯЗЬ

Дубровский В.В., Дулькевич А.И. Алгоритм нелинейного кодирования и декодирования информационного потока методами целочисленных преобразований для информационно защищенных систем подвижной цифровой связи 13

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

Рыбак В.А., Римарев И.М. Автоматизированный комплекс обеспечения тепловой энергией загородного дома с использованием гелиоколлекторов 24

Рябычина О.П., Ходасевич О.Р., Горбадей О.Ю. Анализ использования технологий big data в концепции умного города 31

Половеня С.И., Пытель А.Н. Применение нейронных сетей для оптимизации параметров передачи данных в беспроводных оптических каналах связи 38

Яблочников С.Л., Яблочникова И.О., Шакиров К.Ф. Синтез полиагентных компонентов информационного поиска ресурсов в системах электронного образования 50

КИБЕРФИЗИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Бохан Ю.И. Туннелирование через цилиндрический барьер 61

Вишняков В.А., Чуйэ Ю. ИТ-диагностика болезни Альцгеймера на основе анализа голосовой информации 66

ЦИФРОВЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

Ивашко В.М., Романова Е.С., Михинова Л.М. Основные аспекты цифровой трансформации учреждения высшего образования 72

ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Овчинникова И.А., Шаманова О.О. Анализ использования биометрических технологий и повышение надежности системы распознавания при организации физической защиты информации 82

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 11.12.2023. Формат 60×84/8. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Печать цифровая. Усл. печ. л. 10,16. Уч.-изд. л. 5,85. Тираж 100 экз. Заказ 3193.

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

© Учреждение образования «Белорусская государственная академия связи», 2023

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, 2023, № 2 (18)

30th anniversary of Belarusian State Academy of Communications

Editor-In-Chief A.A. Zianevich

ADRESS OF EDITORIAL OFFICE:

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

355-96-08

pic@bsac.by

CONTENTS

COMMUNICATION TECHNOLOGIES

Zianevich A.A., Novikov E.V., Matkovskaia T.A., Vasileuski H.V., Talkachou A.A. Use of macrobending of optical fiber to separate optical signal streams with different wave lengths 5

DIGITAL COMMUNICATIONS

Dubrouski V.V., Dulkevich A.I. The algorithm of nonlinear information coding and decoding by the methods of integer transformations for secured mobile digital communication systems 13

INTELLIGENT SYSTEMS

Rybak V.A., Rimarev I.M. Automated complex for providing thermal energy for a country house using solar collectors.....24

Ryabychina O.P., Khodasevitch O.R., Gorbadey O.Y. Analysis of the digital transformation trends in the telecommunications industry 31

Palavenia S., Pytsel A. Application of neural networks to optimize data transmission parameters in wireless optical communication channels 38

Yablochnikov S.L., Yablochnikova I.O., Shakirov K.F. On the issue of forming a database of the e-learning process support system 50

CYBERPHYSICAL SYSTEMS

Bokhan Yu.I. Tunneling through the cylindrical barrier 61

Vishniakou U.A., Chuye Y. It diagnostics of Alzheimer's disease based on the analysis of voice information 66

DIGITAL SYSTEMS AND TECHNOLOGIES

Ivashko V.M., Romanova E.S., Mikhinova L.M. The main aspects of the digital transformation of higher education institutions 80

INFORMATION SECURITY

Ovchinnikova I.A., Shamanova O.O. Analysis of the use of biometric technologies and improvement of the reliability of the recognition system in the organization of physical protection of information..... 82

ТЕХНОЛОГИИ СВЯЗИ

УДК 621.391.64

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАКРОИЗГИБА ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА ДЛЯ РАЗДЕЛЕНИЯ ПОТОКОВ ОПТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ С РАЗЛИЧНОЙ ДЛИНОЙ ВОЛНЫ

А.О. ЗЕНЕВИЧ[1], Е.В. НОВИКОВ[2], Т.А. МАТКОВСКАЯ[3], Г.В. ВАСИЛЕВСКИЙ[4], О.А. ТОЛКАЧЁВ[5]

[1]*Учреждение образования «Белорусская государственная академия связи», ул. Ф. Скорины, 8/2, Минск, 220076, Беларусь*
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3534-3885

[2]*Учреждение образования «Белорусская государственная академия связи», ул. Ф. Скорины, 8/2, Минск, 220076, Беларусь*
ORCID: https://orcid.org/0009-0009-2944-758X

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

[4]*Учреждение образования «Белорусская государственная академия связи», ул. Ф. Скорины, 8/2, Минск, 220076, Беларусь*
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0584-1661

[5]*Учреждение образования «Белорусская государственная академия связи», ул. Ф. Скорины, 8/2, Минск, 220076, Беларусь*
ORCID: https://orcid.org/0009-0006-2716-1316

Поступила в редакцию 12 июля 2023

Предложен способ использования макроизгиба оптического волокна для разделения потоков оптических сигналов с различными длинами волн. Показана возможность разделения оптических импульсов с длинами волн 1310 и 1625 нм, передаваемых по волокну путем создания на нем макроизгиба определенного диаметра. Получено, что для разных типов оптических волокон возможно подобрать диаметр макроизгиба, при котором возможно осуществить разделение импульсных оптических потоков с разными длинами волн. Критерием выбора диаметра является наибольшее значение показателя ΔD_n – разности дополнительных потерь мощности излучения, вносимых макроизгибом, для длин волн 1310 и 1625 нм. Установлено, что наибольшее значение величины ΔD_n наблюдается для оптического волокна G655, а наименьшее – для волокна G657.

Ключевые слова: одномодовые оптические волокна, макроизгиб, информационная безопасность, разделение оптических импульсов

Введение. В системах передачи данных в настоящее время в качестве среды передачи широко используются волоконно-оптические линии (ВОЛС) [1, 2], что связано с их высокой пропускной способностью. Оптические информационные сигналы в ВОЛС распространяются внутри оптического волокна. Несмотря на это, несанкционированный доступ к сигналам не исключен, а способы несанкционированного доступа достаточно хорошо известны [3, 4]. Поэтому обеспечение информационной безопасности ВОЛС является важной и актуальной задачей.

В работе [5] был предложен способ, позволяющий обеспечивать защиту информации, транслируемой по ВОЛС. Сущность способа заключается в том, что информация транслируется по оптическому волокну на длине волны 1310 нм, а одновременно с передачей информации выполняется трансляция оптического излучения постоянной мощности с длиной волны 1625 нм. При этом осуществляется отвод части излучения из оптического волокна при помощи ответвителя-прищепки и контроль мощности этой части. По уменьшению контролируемой величины мощности делают заключение о наличии в линии связи несанкционированного пользователя.

Однако при использовании ответвителя-прищепки на приемник, необходимый для контроля мощности, поступает не только постоянное оптическое излучение с длиной волны 1625 нм, но и излучения с длиной волны 1310 нм. Последнее является помеховым и приводит к появлению дополнительной погрешности измерения мощности оптического излучения с длиной волны 1625 нм.

Поэтому целью данной работы стало определение возможности создания в оптическом волокне макроизгибов с такими параметрами, при которых на приемник контроля мощности поступало бы только излучение с длиной волны 1625 нм.

Экспериментальная установка и методика проведения исследований. Объектами исследований, результаты которых представлены в работе, являлись одномодовые оптические волокна G652, G655 и G657. Данные типы волокон в настоящее время наиболее часто применяются в оптических кабелях. Для проведения исследований использовалась экспериментальная установка, структура которой представлена на рис. 1.

Экспериментальная установка функционирует следующим образом. Работа двух генераторов прямоугольных импульсов Г1 и Г2 синхронизирована между собой. При этом генератор Г1 формирует импульс длительностью 500 нс. После окончания импульса, созданного генератором Г1, генератор Г2 формирует импульс длительностью 700 нс. Отметим, что длительности этих импульсов и интервалы между ними могут быть изменены.

Электрический импульс с выхода генератора Г1 поступал на управляющий вход источника оптического излучения И1, который формировал оптический импульс с длиной волны 1310 нм, мощностью 100 мкВт и длительностью, соответствующей длительности электрического импульса, поступившего на вход источника. Электрический импульс с выхода генератора Г2 поступал на вход источника оптического излучения И2, на выходе которого формировался оптический импульс с длиной волны 1625 нм, мощностью 100 мкВт и длительностью, соответствующей длительности электрического импульса, поступившего на вход этого источника.

Источники И1 и И2 при помощи патч-кордов ПЧ1 и ПЧ2 подключены соответственно к первому и второму входу смесителя С. С выхода смесителя С оптические импульсы источников И1 и И2 направлялись через патч-корд ПЧ3 на вход оптического разветвителя Р. Первый выход разветвителя подключался к приемнику оптического излучения П1 с помощью патч-корда ПЧ4. Второй выход соединялся с приемником оптического излучения П2 при помощи оптического волокна ОВ протяженностью 1 м. При такой протяженности оптического волокна потерей мощности оптического излучения в этом волокне можно пренебречь.

В качестве фотоприемников использовались волоконно-оптические InGaAs *p-i-n* фотодиодные модули ВОФМ-10-1550, чувствительность которых лежит в диапазоне от 900 до 1700 нм, причем в диапазоне от 1060 до 1550 нм она максимальна и равномерна [6].

Выходные сигналы приемников оптического излучения П1 и П2 контролировались цифровым двухканальным осциллографом ОС, синхронизированным с генераторами Г1 и Г2. Осциллограф позволял также измерять параметры сигналов приемников.

На оптическом волокне ОВ при помощи формирователя изгиба Ф создавался макроизгиб в виде одного полного витка, представляющего собой окружность. Диаметр этого макроизгиба мог изменяться в интервале от 5 до 30 мм. Такой интервал диаметров был выбран, поскольку при диаметре макроизгиба более 30 мм для длин волн 1310 и 1625 нм потери мощности оптического излучения на макроизгибе были ниже чувствительности регистрирующей аппаратуры, а при диаметрах менее 5 мм резко увеличивалась вероятность излома оптического волокна.

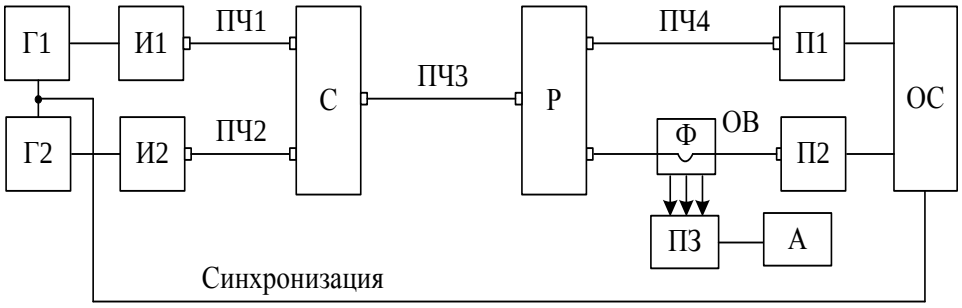


Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки:
Г1, Г2 – генераторы прямоугольных импульсов; И1, И2 – источники оптического излучения; ПЧ1–ПЧ4 – оптические патч-корды; С – смеситель; Р – разветвитель; Ф – формирователь изгиба; ОВ – оптическое волокно; П1–П3 – приемники оптического излучения; ОС – осциллограф; А – амперметр

В процессе проводимых исследований измерялись потери мощности оптического излучения на макроизгибе оптического волокна. Также определялась мощность оптического излучения, которое выводилось за пределы волокна в области его макроизгиба.

Вносимые макроизгибом оптического волокна дополнительные потери мощности излучения оценивались с использованием величины $D_п$ [7], которая рассчитывалась по следующей формуле:

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

где P – мощность источника излучения ИИ, $P_в$ – мощность оптического излучения, поступающая на ИМ при наличии макроизгиба.

Оценка мощности оптического излучения, выводимого за пределы волокна в области его макроизгиба, выполнялась с помощью фотоприемника П3, который располагался вблизи области макроизгиба (рис. 1).

Измерялась также величина электрического тока $I_т$, протекающего через фотоприемник П3 при отсутствии оптического излучения в волокне ОВ, и величина электрического тока I при наличии оптического излучения.

Отводимая мощность оценивалась на основании величины $D_в$, которая рассчитывалась на основании выражения:

$$D_в = 10\lg\left(\frac{I - I_{\text{т}}}{PS}\right), \tag{2}$$

где S – чувствительность фотоприемника.

Измерения проводились в соответствии с требованиями ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 [8], контролировались условия окружающей среды: температура от 20 до 25 °С, влажность до 70 %, атмосферное давление от 975 до 1025 гПа.

Результаты экспериментальных исследований. На рис. 2 показаны зависимости величины $D_п$ от диаметра макроизгиба d. Данные зависимости получены для оптического волокна G655. Для других типов оптического волокна эти зависимости были аналогичными. Как следует из полученных зависимостей уменьшение диаметра макроизгиба приводило к уменьшению величины $D_п$ для всех исследуемых длин волн. Это связано с тем, что в месте перехода прямой части волокна в изогнутую происходит смещение модового пятна. В результате только часть мощности моды сердцевины прямой части оптического волокна передается в сердцевину изогнутой части, а другая часть этой мощности переходит в оболочку и теряется [9]. Следовательно, при меньшем диаметре макроизгиба происходит большее смещение модового пятна, что приводит к росту потерь мощности излучения на макроизгибе.

Так, для представленных зависимостей на рис. 2 при значениях *d*, равных 15 мм и более для длины волны 1310 нм, вносимые макроизгибом дополнительные потери мощности излучения на макроизгибе $D_n \geq -4$ дБ. При диаметре макроизгиба $d = 15$ мм наблюдается потеря мощности оптического излучения для длины волны 1625 нм $D_n = -22$ дБ.

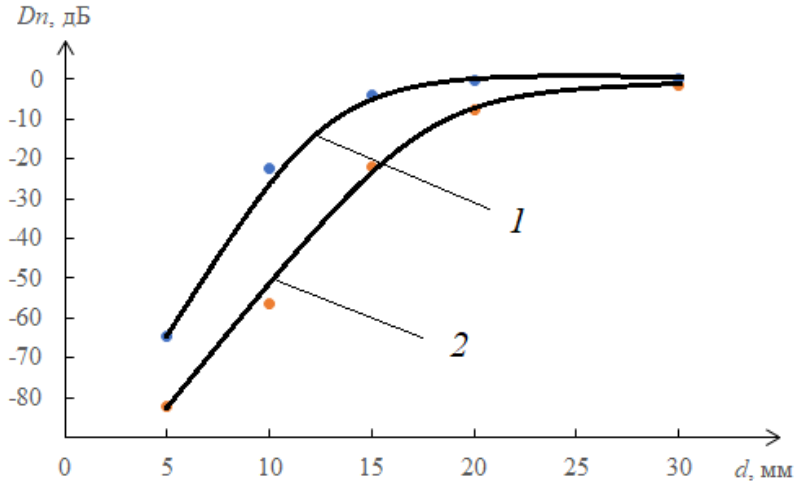


Рис. 2. Типичные зависимости дополнительных потерь мощности от диаметра изгиба для длин волн: 1310 нм (1) и 1625 нм (2)

На рис. 3 показаны полученные зависимости величины мощности $D_в$ ответвляемого с изгиба оптического волокна излучения от диаметра изгиба *d*. Данные зависимости получены для оптического волокна G655. Для других типов оптических волокон эти зависимости имели аналогичный вид.

Как следует из полученных результатов, увеличение диаметра изгиба приводит к уменьшению величины $D_в$. Для длины волны оптического излучения 1310 нм значение $D_в$ было меньше, чем для длины волны 1625 нм при всех исследуемых диаметрах изгиба. Это связано с тем, что увеличение длины волны приводит к росту диаметра модового пятна, а значит, и его площади. Чем больше площадь модового пятна, тем большая часть распространяющегося по волокну излучения оказывается в оболочке оптического волокна и затем покидает волокно через его боковую поверхность.

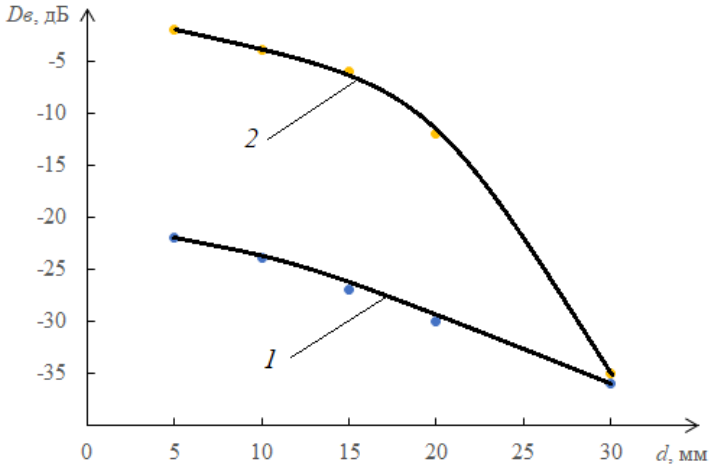


Рис. 3. Типичные зависимости доли мощности, отводимой за пределы волокна в области макроизгиба, от диаметра изгиба для ОВ: 1310 нм (1), 1625 нм (2)

Так, для представленных на рис. 3 зависимостей при значениях d от 15 мм и выше для длины волны 1310 нм отводимая за пределы оптического волокна в области макроизгиба мощность была незначительной, поскольку $D_в \leq$ -27 дБ.

При d = 15 мм для излучения с длиной волны 1625 нм величина $D_в$ составляла -6 дБ.

Такое отличие в зависимостях $D_в$ от d для различных длин волн, как было отмечено выше, связано с увеличением диаметра модового пятна при увеличении длины волны.

По зависимостям $D_п$ от d, полученным при длинах волн оптического излучения 1310 и 1625 нм, для исследуемых оптических волокон определены значения диаметров макроизгиба d_{max}, при которых была наибольшей величина $\Delta D_п = |D1_п - D2_п|$, где $D1_п$ и $D2_п$ – вносимые макроизгибом одного диаметра дополнительные потери мощности излучения для длин волн 1310 и 1625 нм соответственно (табл. 1).

Таблица 1

Характеристики макроизгибов оптических волокон

Оптическое волокно	G652		G655		G657	
Диаметр макроизгиба d_{max}, мм	10		15		10	
Длина волны, нм	1310	1625	1310	1625	1310	1625
Величина $D_в$, дБ	-17	-7	-27	-18	-24	-12
Величина $D_п$, дБ	-2	-18	-4	-22	-1	-16

Как следует из табл. 1, для d_{max} величина $\Delta D_п$ принимала следующие значения: 16 дБ – для оптического волокна G652, 18 дБ – для G655, 15 дБ – для G657.

Величина мощности оптического излучения, отводимого за пределы волокна в области макроизгиба, для диаметров макроизгибов d_{max} была наибольшей для длины волны 1625 нм независимо от типа оптического волокна (табл. 1). При направлении одинаковой мощности оптического излучения в волокно на длинах волн 1310 и 1625 нм для длины волны 1625 нм мощность излучения, отводимого за пределы волокна в области макроизгиба, при d_{max} превышает мощность для длины волны 1310 нм на 10 дБ в оптическом волокне G652, на 9 дБ – в G655, на 12 дБ – в G657.

На рис. 4 представлены осциллограммы сигналов при значении диаметра d_{max} для оптического волокна G655. Эти осциллограммы показывают возможность отделения при помощи макроизгиба оптического импульса с длиной волны 1310 нм от оптического импульса с длиной волны 1625 нм.

Так, на приемник П1 экспериментальной установки (рис. 1) поступают оптические импульсы с длинами волн 1310 и 1625 нм. При этом амплитуда электрических импульсов, поступающих на приемник П1, была одинаковой (рис. 3а). После разветвителя Р на макроизгиб оптического волокна поступали такие же оптические импульсы, как и на приемник П1.

Как оказалось, после прохождения макроизгиба приемник П2 регистрирует только электрические импульсы, вызванные оптическими импульсами с длиной волны 1310 нм (рис. 3б). При этом наблюдается небольшое уменьшение амплитуды этих импульсов. Это обусловлено тем, что при прохождении оптического излучения с длиной волны 1310 нм через макроизгиб диаметром d_{max} наблюдались дополнительные потери мощности излучения, составляющие не менее -4 дБ (табл. 1).

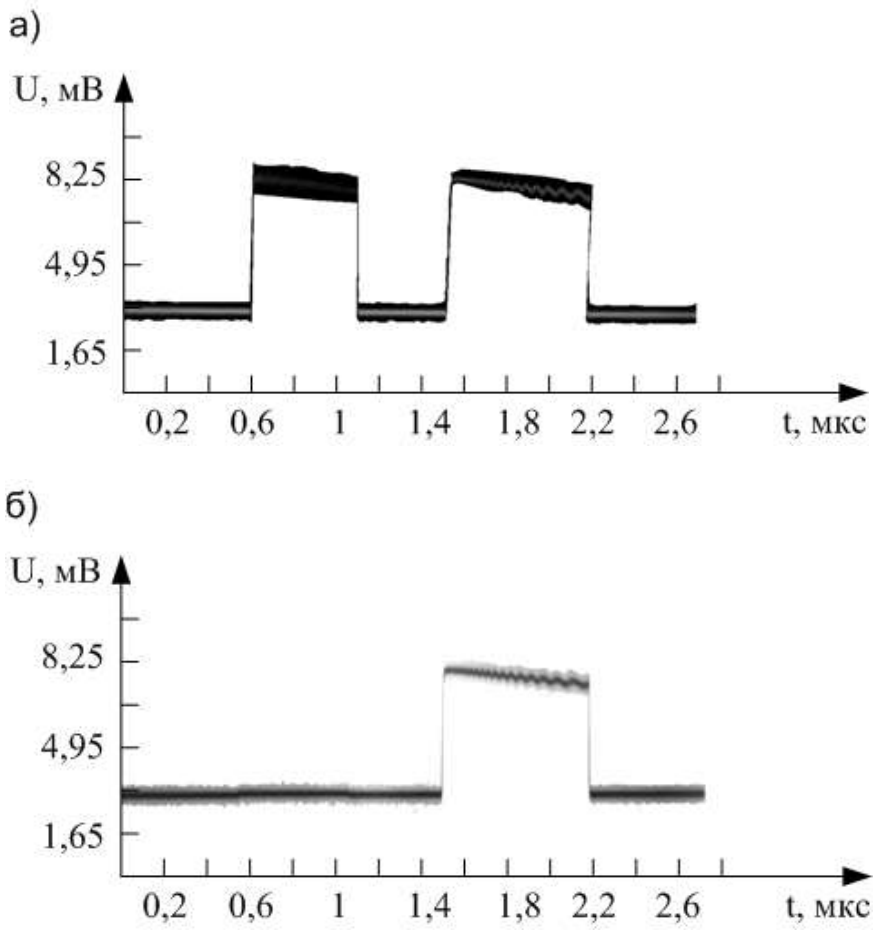


Рис. 4. Осциллограммы сигналов в оптическом волокне до макроизгиба (а) и после макроизгиба (б)

Отделить оптический импульс с длиной волны 1625 нм от оптического импульса с длиной волны 1310 нм также можно при помощи макроизгиба. Для этого необходимо регистрировать оптическое излучение, выходящее за пределы оптического волокна в области макроизгиба. В этом случае наблюдается наименьшее ослабление мощности для оптических импульсов с длиной волны 1625 нм, а наибольшее – для оптических импульсов с длиной волны 1310 нм для всех исследуемых оптических волокон.

При значениях диаметров макроизгибов d_{max} удается отделить оптический импульс с длиной волны 1625 нм от оптического импульса с длиной волны 1310 нм, аналогично случаю, представленному на рис. 3. Однако при практически полном ослаблении оптического импульса с длиной волны 1310 нм наблюдается и уменьшение мощности оптического импульса с длиной волны 1625 нм на -1,4 дБ.

В табл. 2 представлены значения $D_в$ и $D_п$ для макроизгиба, сформированного ответвителем-прищепкой FOD-5503.

Таблица 2

Характеристики макроизгибов оптических волокон при использовании ответвителя-прищепки

Оптическое волокно	G652		G655		G657	
Длина волны, нм	1310	1625	1310	1625	1310	1625
Величина $D_в$, дБ	–19	–6	–12	–2	–19	–7
Величина $D_п$, дБ	–1	–5	–6	–10	–1	–4

Как видно из представленных в табл. 2 результатов, макроизгиб, сформированный ответвителем-прищепкой, не позволяет обеспечить полное отделение оптических импульсов с длиной волны 1310 нм от оптических импульсов с длиной волны 1625 нм, в противоположность тому, как это удается сделать для макроизгиба оптического волокна с диаметром d_{max}.

Заключение. Показана возможность создания в оптическом волокне макроизгиба такого диаметра, при котором можно отделить оптические импульсы с длиной волны 1310 нм от оптических импульсов с длиной волны 1625 нм в условиях их одновременной передачи по оптическому волокну.

Получено, что для каждого оптического волокна необходимо подбирать диаметр макроизгиба, при котором можно реализовать отделение оптических импульсов с длиной волны 1310 нм от оптических импульсов с длиной волны 1625 нм. Критерием выбора нужного диаметра является наибольшее значение показателя ΔD_n.

Установлено, что наибольшее значение величины ΔD_n наблюдается для оптического волокна G655, а наименьшее – для волокна G657.

Применение предложенного подхода возможно также и для разделения потоков оптических сигналов с другими длинами волн, попадающими в разные окна прозрачности оптического волокна.

Статья выполнена в рамках проектов ГПНИ «Цифровые и космические технологии, безопасность человека, общества и государства» № договора ФИ 05-21 от 07.06.2021 (2021–2025) №ГР 20212714; ГПНИ «Фотоника и электроника для инноваций» № договора ФИ 04-21 от 07.06.2021 (2021–2025) №ГР 20212713; БРФФИ «Принципы построения распределенных систем на амплитудных волоконно-оптических датчиках» № договора Т22М-002 от 04.05.2022 (2022–2024) №ГР 20221243.

USE OF MACROBENDING OF OPTICAL FIBER TO SEPARATE OPTICAL SIGNAL STREAMS WITH DIFFERENT WAVE LENGTHS

A.O. ZIANEVICH, E.V. NOVIKOV, T.A. MATKOVSKAIA, H.V. VASILEUSKI, A.A. TALKACHOU

Abstract

A method is proposed for using the macrobend of an optical fiber to separate streams of optical signals with different wavelengths. The possibility of separating optical pulses with wavelengths of 1310 and 1625 nm transmitted through the fiber by creating a macrobend of a certain diameter on it is shown. It has been found that for different types of optical fibers it is possible to choose the macrobend diameter at which it is possible to separate pulsed optical flows with different wavelengths. The criterion for choosing the diameter is the largest value of the indicator ΔD_p – the difference between the additional radiation power losses introduced by the macrobend for wavelengths of 1310 and 1625 nm. It has been established that the largest value of ΔD_p is observed for the G655 optical fiber, and the smallest for the G657 fiber.

Список литературы

1. Дмитриев, С. А. Волоконно-оптическая техника : современное состояние и новые перспективы / С. А. Дмитриев, Н. Н. Слепов. – М : Техносфера, 2010. – 607 с.

2. Govind, P. Agrawal Fiber-Optic Communication Systems / P. Govind. – New York : Wiley-Interscience, 2002. – 563 с.

3. Шубин, В. В. Информационная безопасность волоконно-оптических систем / В. В. Шубин. – Саров : РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2015. – 257 с.

4. Зеневич, А. О. Обнаружители утечки информации из оптического волокна / А. О. Зеневич. – Минск : Белорусская государственная академия связи, 2017. – 142 с.

5. Зеневич, А. О. Способ выявления утечки данных из волоконно-оптических линий связи с использованием ответвителя-прищепки / А. О. Зеневич, Е. В. Новиков, Т. А. Матковская // Проблемы инфокоммуникаций. – 2022. – № 1 (15). – С. 5–12.

6. Технический паспорт. Многоканальная волоконно-оптическая линия передачи синхроимпульсов ВОЛП-10-М.

7. Гулаков, И. Р. Обнаружение канала утечки информации из многомодового оптического волокна при помощи кремниевого фотоумножителя / И. Р. Гулаков [и др.] // Доклады БГУИР. – 2022. – № 6 (20). – С. 37–44.

8. Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий : ГОСТ ISO/IEC 17025-2019. – Введ. 01.09.2019. – М. : Стандартинформ, 2019. – 32 с.

9. Василевский, Г. В. Исследование характеристик отраженного излучения в оптическом волокне как основы создания волоконно-оптических датчиков / Г. В. Василевский [и др.] // Слово науковця. – 2019. – № 1. – С. 40–44.

ЦИФРОВАЯ СВЯЗЬ

УДК 621.391

АЛГОРИТМ НЕЛИНЕЙНОГО КОДИРОВАНИЯ И ДЕКОДИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННОГО ПОТОКА МЕТОДАМИ ЦЕЛОЧИСЛЕННЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ ДЛЯ ИНФОРМАЦИОННО ЗАЩИЩЕННЫХ СИСТЕМ ПОДВИЖНОЙ ЦИФРОВОЙ СВЯЗИ

В.В. ДУБРОВСКИЙ[1], А.И. ДУЛЬКЕВИЧ[2]

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

[2]*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 22 ноября 2023

Рассмотрен метод кодирования и декодирования двоичного информационного потока методами нелинейной динамики в конечном поле объемом N, каждое состояние в котором определяется числом разрядности $M = \log_2[N]$. Предложенный алгоритм определен для чисел со знаком и обеспечивает эффективные формирование и обработку сигнала в системах цифровой связи. Приведены алгоритмы и результаты численного моделирования. Показана принципиальная возможность самовосстановления декодирующей способности устройства обработки сигнала в условиях действия помех.

Ключевые слова: защита информации, помехоустойчивое кодирование, система 5G, нелинейная динамика, целочисленная арифметика, динамический диапазон, блочное кодирование, автокорреляционная функция, случайно-подобный процесс.

Введение и постановка задачи. Представленные в ряде источников [1–6] алгоритмы кодирования информации методами нелинейной динамики хорошо работают в системах с континуумом значений или в цифровых системах с разрядностью вычисления состояний кодированного сигнала, равной или превышающей 32 бита, что для практических приложений не всегда применимо по причине использования в реальных системах цифровой радиосвязи быстродействующих арифметико-логических устройств меньшей разрядности. В настоящей статье предпринята попытка адаптации хорошо изученных алгоритмов кодирования информационного потока [3, 7–8] для систем с разрядностью преобразования и хранения информации менее 32 бит. Типичные значения разрядности цифровых сигнальных процессоров в радиочастотных модулях составляют 8 бит, реже 10–24 бит. Подобного рода устройства отличаются сравнительно высокой скоростью вычислений и меньшим энергопотреблением, что является ключевым показателем для автономно функционирующих оконечных устройств систем подвижной цифровой радиосвязи.

Алгоритмы на основе методов нелинейной динамики в указанном применении позволят создать энергоэффективные системы передачи информации, в том числе для новых стандартов систем подвижной цифровой связи, включая 5G NR, поскольку обеспечивают малые задержки информации и реализуются сравнительно простыми вычислительными методами. Существенной проблемой на этом пути является необходимость определения типа и параметров порождающих функций, обеспечивающих генерацию случайно-подобного процесса,

и эффективных алгоритмов информационной модуляции для последующей передачи сигнала в условиях действия помех. Не менее важным видится определение базовых характеристик сформированного кодированного потока, в первом приближении определяющих информационную безопасность канала передачи информации.

1. Алгоритм нелинейного подмешивания информационного сигнала в динамическую систему. Целочисленная арифметика со знаком и нулевой дробной частью предполагает осуществление операций сложения и умножения в конечном поле $GF\left(2^M\right)$ объемом N, технически обеспечиваемого цифровой системой с разрядностью счета $M = \log_2[N]$. Так, если для формирования и обработки сигнала использовать микроконтроллер разрядностью M = 8, то значения сигнальных отсчетов будут находиться на отрезке $[-2^{(M-1)};\ 2^{(M-1)}-1]$, где первый бит числа будет определять его знак: 1 – число отрицательное, 0 – число положительное. В алгоритмах нелинейной динамики знак числа фундаментальной роли не играет; он вводится поскольку технически при формировании полезного сигнала для передачи по радиоканалу удобнее использовать значения со знаком как имеющие нулевую постоянную составляющую.

Адаптированный алгоритм формирования полезного сигнала s_k согласно [6], адаптированного к вычислению в системах с целочисленной арифметикой, представлен в выражении (1):

$$\begin{cases} s_k = F\left[p_{0,\,k-1} + \alpha\, p_{1,\,k-1} s_{k-1} + \alpha\, p_{2,\,k-1} s_{k-2}\right] + X_x,\ \ k = 2, 3, 4, \ldots; \\ p_{0,\,k} = F\left[f_{p0}(p_{0,\,k-1})\right],\ \ p_{1,\,k} = F\left[f_{p1}(p_{1,\,k-1})\right],\ \ p_{2,\,k} = F\left[f_{p2}(p_{2,\,k-1})\right]; \\ s_0 = H_0,\ \ s_1 = H_1,\ \ p_{0,1} = C_0,\ \ p_{1,1} = C_1,\ \ p_{2,1} = C_2, \end{cases} \tag{1}$$

где $F[\cdot]$ – нормирующая функция, аналитическое выражение и алгоритм вычисления которой даны в [6]; $p_{0,\,k}$, $p_{1,\,k}$, $p_{2,\,k}$ – коэффициенты порождающей функции, рекуррентно вычисляемые и изменяющиеся на каждом такте k вычисления значений последовательности s_k; $\alpha \in (0;\ 2^{(M-1)})$ – параметр, определяющий максимально возможное значение коэффициентов $p_{1,\,k}$, $p_{2,\,k}$, X_k– передаваемая информационная последовательность, технически представляющая собой число с разрядностью, не превышающей M, f_{p0}, f_{p1}, f_{p2} – произвольные функции одного аргумента, порождающие последовательность значений $p_{0,\,k}$, $p_{1,\,k}$, $p_{2,\,k}$ соответственно; H_0, H_1 – два начальных состояния основной нелинейной динамической системы (НДС), с которых начинается рекуррентное вычисление полезного сигнала s_k; C_0, C_1, C_2 – начальные состояния НДС, формирующих параметры $p_{0,\,k}$, $p_{1,\,k}$, $p_{2,\,k}$ соответственно.

Основная задача нормирующей функции $F[\cdot]$ – приводить результат вычисления порождающих функций к отрезку $[-2^{(M-1)};\ 2^{(M-1)}-1]$ вне зависимости от ее аргумента, тем самым фиксируя динамический диапазон сигнала и обеспечивая работоспособность алгоритма в реальных системах передачи информации. Следует отметить, что для систем с целочисленной арифметикой нормирующую функцию $F[\cdot]$ можно исключить, поскольку величина динамического диапазона сигнала определяется естественным образом путем либо «ограничения» (saturation), либо «проворачивания» (wrap) значений в заданном поле. Процедура «проворачивания» предполагает, что для случая, например, $M = 8$ запрещенное значение «128» перейдет в состояние «-128», «129» – в «-127» и так далее. В свою очередь, запрещенное отрицательное значение «-129» перейдет в разрешенное состояние «127», «-130» – в «126».

Уровень подмешивания γ, указанный в алгоритме генерации [6], в нашем случае отсутствует, поскольку лишен физического смысла. В алгоритме с плавающей запятой значение информационного процесса x_k изменяется на каждом такте на величину ±1 и, в силу ограниченности динамического диапазона формируемого сигнала, требует уменьшения до величины 0,1–0,4. В случае генерации сигнала в системе с целочисленной арифметикой на каждом такте добавляется информационный блок длиной меньшей или равной M, а не отдельный

бит информации, поэтому стохастическая природа формируемого сигнала также обеспечивается естественным образом по причине случайной природы информационного процесса X_k.

В связи с тем, что в алгоритме заложен второй механизм обеспечения запутанности фазовых траекторий – через постоянно изменяемые параметры $p_{0,k}$, $p_{1,k}$, $p_{2,k}$ основной порождающей функции, – то значительного увеличения α не требуется, и в этом основное отличие алгоритма от известных. Однако устремлять параметр α к нулю также нежелательно, поскольку «вклад» компонент $\alpha p_{1,k-1}s_{k-1}$ и $\alpha p_{1,k-1}s_{k-2}$ в стохастизацию кодированной последовательности s_k становится пренебрежимо малым и наличие вспомогательных НДС, формирующих параметры $p_{1,k}$ и $p_{2,k}$ теряет смысл. Технически подобная ситуация вырождает алгоритм к простому суммированию псевдослучайной последовательности и информационного сигнала – классическая система с маскировкой передаваемой информации.

Коэффициенты $p_{0,k}$, $p_{1,k}$, $p_{2,k}$ порождающей функции (1) должны быть простыми числами, в ином случае система находит решение и зацикливается на одном значении. Следовательно, при малых M таких чисел немного, поскольку определяются в диапазоне $[-2^{(M-1)};\ 2^{(M-1)}-1]$. Иначе говоря, разнообразие «ключей шифрования» при малых M конечно и весьма ограничено, в связи с чем требуется увеличение сложности основной функции – только в этом случае в реальных приложениях больше комбинаций «ключей». Указанная особенность несколько ограничивает применение алгоритма (1) в системах цифровой связи.

2. Алгоритм генерации и информационной модуляции сигнала системой $Q \le M$ неперекрывающихся кодирующих функций.

2.1. Алгоритм кодирования информационного потока. Большие возможности и гибкость в управлении представляет алгоритм кодирования-декодирования, реализующий систему из $Q \in [1;\ M]$ кодирующих функций специального вида, определяемых для каждого из 2^Q информационных состояний и однозначно идентифицируемых на стороне приема. Один из возможных вариантов кодера описывается следующим выражением:

$$h_k = \begin{cases} f_0(h_{k-1}, h_{k-2}) = a_0 h_{k-1} + b_0 h_{k-2} + q_0, \text{ если } x = 0; \\ f_1(h_{k-1}, h_{k-2}) = a_1 h_{k-1} + b_1 h_{k-2} + q_1, \text{ если } x = 1; \\ \quad \dots \\ f_i(h_{k-1}, h_{k-2}) = a_i h_{k-1} + b_i h_{k-2} + q_i, \text{ если } x = i; \\ \quad \dots \\ f_{N-1}(h_{k-1}, h_{k-2}) = a_{N-1} h_{k-1} + b_{N-1} h_{k-2} + q_{N-1}, \text{ если } x = 2^{N-1}, \end{cases} \tag{2}$$

где $k \in N$ – порядковый номер рабочего такта кодера, имеющий физический смысл времени; $i = \overline{0,\ N-1}$, $N = 2^Q$.

Все преобразования осуществляются в конечном поле целых чисел со знаком $GF(2^M)$. Начальные условия h_1, h_2 определяются заранее и, совместно с матрицей параметров a_i, b_i, q_i являются элементами ключа шифрования, известного на стороне передачи и стороне приема.

Система уравнений (2) описывает последовательность дискретных отсчетов рекуррентно вычисляемой последовательности h_k, являющейся случайным процессом в силу случайного характера значений отсчетов информационного потока. Информационная скорость передачи определяется отношением количества полезной информации Q, передаваемой за 1 такт работы кодера, к его разрядности M:

$$R = \frac{Q}{M}. \tag{3}$$

Однозначное восстановление информации на стороне приема и обработки возможно благодаря точному знанию параметров и структуры системы функций (2).

Здесь и в дальнейшем множество функций (2) будем называть порождающими функциями, или **системой порождающих функций**, определяющих характеристики кодирования. Отметим, что вид порождающих функций может быть произвольным; они могут включать в себя как два аргумента h_{k-1}, h_{k-2}:

$$f_i(h_{k-1}, h_{k-2}) = a_i h_{k-1} + b_i h_{k-2} + q_i, \; i = \overline{1, Q}, \tag{4}$$

так и три:

$$f_i(h_{k-1}, h_{k-2}, h_{k-3}) = a_i h_{k-1} + b_i h_{k-2} + c_i h_{k-3} + q_i, \; i = \overline{1, Q}, \tag{5}$$

где a_i, b_i, c_i, q_i – произвольные параметры функций из поля $GF(2^M)$, для которых можно определить некую оптимальную комбинацию.

В настоящем исследовании ограничимся функциями двух аргументов. В контексте обсуждения остро встает проблема подбора параметров a_i, b_i, q_i системы кодирующих функций таким образом, что, при всех возможных комбинациях h_{k-1} и h_{k-2} функции **попарно не пересекались**. При этом параметры при переменных могут быть произвольными, но не должны равняться нулю: $a_i \neq 0$, $b_i \neq 0$. Условие следует из необходимости обеспечить стохастизацию колебаний в случае подачи на вход кодера информационного процесса в форме регулярной последовательности, то есть в том случае, когда информационные блоки повторяются в течение длительного времени. Для систем цифровой связи 4-го (4G LTE), 5-го (5G IMT 2020) поколений это не принципиально, поскольку в них используются эффективные алгоритмы скремблирования, однако для других защищенных систем передачи информации универсальности алгоритма указанное требование необходимо обеспечить.

Необходимость попарного непересечения кодирующих функций $f_i(h_{k-1}, h_{k-2})$ требует их тщательного подбора на этапе проектирования системы цифровой связи. В ином случае для различных информационных блоков будут иметь место одинаковые результаты, что не позволит осуществить корректное декодирование сигнала на стороне приема и обработки.

2.2. Формализация задачи поиска коэффициентов системы кодирующих функций. Задана система Q полиномиальных функций вида:

$$\begin{cases} f_0(h_{k-1}, h_{k-2}) = a_0 h_{k-1} + b_0 h_{k-2} + q_0; \\ f_1(h_{k-1}, h_{k-2}) = a_1 h_{k-1} + b_1 h_{k-2} + q_1; \\ \quad \dots \\ f_i(h_{k-1}, h_{k-2}) = a_i h_{k-1} + b_i h_{k-2} + q_i; \\ \quad \dots \\ f_{N-1}(h_{k-1}, h_{k-2}) = a_{N-1} h_{k-1} + b_{N-1} h_{k-2} + q_{N-1}. \end{cases} \tag{6}$$

Выражение (6) удобно представить в более компактной матричной форме:

$$\mathbf{F}(h_{k-1}, h_{k-2}) = \mathbf{P} \times \begin{bmatrix} h_{k-1} \\ h_{k-2} \\ 1 \end{bmatrix}, \tag{7}$$

где

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} a_0 & b_0 & q_0 \\ & \cdots & \\ a_{N-1} & b_{N-1} & q_{N-1} \end{bmatrix} \tag{8}$$

матрица коэффициентов системы порождающих функций информационного кодера – порождающая матрица; $\mathbf{F}(\cdot)$ – множество кусочно-линейных функций вида (4).

Как было указано ранее, в целях эффективного безошибочного декодирования информационного потока требуется подобрать множество параметров a_i, b_i, q_i таким образом, чтобы каждая из функций $f_i(h_{k-1}, h_{k-2})$ не давала одинаковый результат с другими $2^Q - 1$ функциями. Все функции заданы в поле Галуа $GF(2^M)$ на отрезке целочисленных значений $[-2^{(M-1)};\ 2^{(M-1)} - 1]$. Соответственно, искомые параметры также определяются на указанном отрезке. При этом: $Q \in (1; M]$; $a_i \neq 0$, $b_i \neq 0$.

Фактически мы решаем вариационную задачу по поиску системы функций, удовлетворяющих определенному условию, что для $M > 4$ представляет собой сравнительно сложную аналитическую проблему и поэтому в первом приближении воспользуемся численными методами. При рассмотрении системы уравнений (6) вероятность появления запрещенных комбинаций увеличения M стремится к нулю пропорционально $1/M^2$.

2.3. Численное моделирование задачи. Объемное численное моделирование показало, что строгое выполнение данного условия возможно лишь для $Q \leq M/4$. Так, при $M = 8$ и $Q = 2$, на каждом такте работы кодера определяющими являются всего 2 бита информации из 8 возможных. Порождающая матрица одной из возможных приемлемых систем уравнений может быть определена следующим образом:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} -73 & -59 & -9 \\ 97 & -109 & 22 \\ -89 & 61 & -21 \\ 43 & -107 & -91 \end{bmatrix}.$$

Для $Q \in (M/4;\ M]$ условие затруднительно выполнить даже в случае допущения одинаковых результатов для 2-х функций из системы 2^Q функций в указанном диапазоне.

Само по себе аналитическое определение коэффициентов (8) системы уравнений (7), удовлетворяющих указанному выше требованию, является отдельной интересной теоретико-числовой задачей.

На рис. 1 и 2 представлены результаты анализа системы уравнений (6) при $M = 8$ и $Q = 4$.

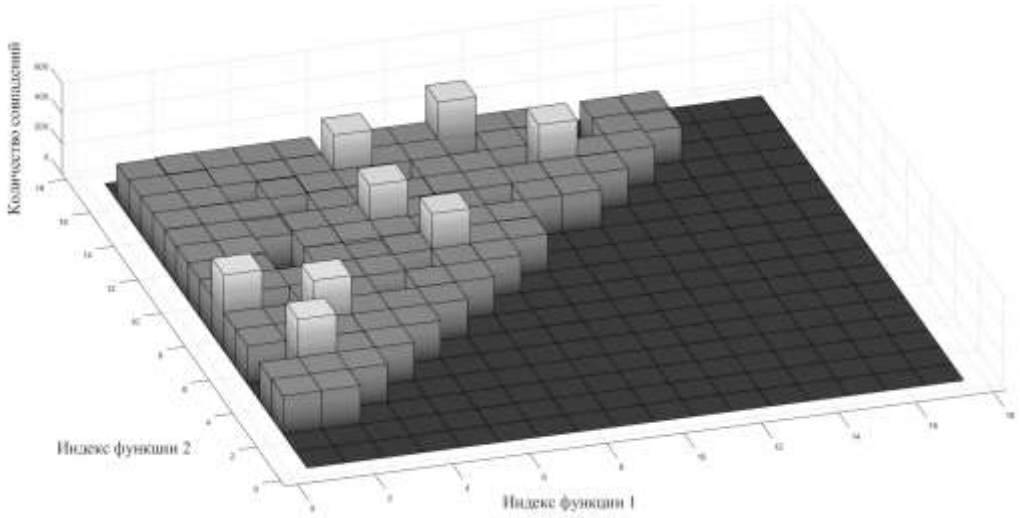


Рис. 1. Трехмерная гистограмма количества совпадений функций (6) в 8-разрядной системе с объемом информационного блока 4

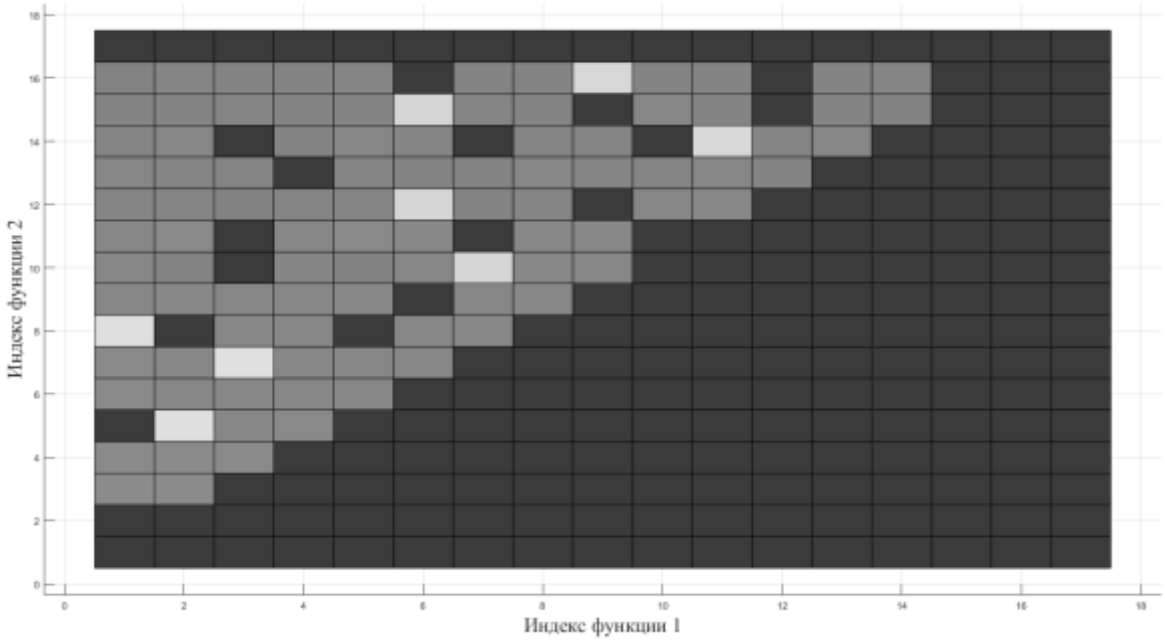


Рис. 2. Вид в плоскости абсцисса-ордината (вид «сверху») на трехмерную гистограмму совпадений, приведенную на рис. 1

По оси абсцисс и ординат на рис. 1 и 2 указаны индексы функций системы (6) из 16 уравнений. По оси аппликат на рис. 1 указано количество совпадений результатов вычисления конкретной пары функций $f_i(h_{k-1}, h_{k-2})$ и $f_j(h_{k-1}, h_{k-2})$, $i \neq j$ на всей области определения $[-2^{(M-1)};\ 2^{(M-1)}-1]$ для всех 2^{2M} возможных комбинаций аргументов. Объем статистики по поиску коэффициентов для указанных результатов составила 8×10^7 случайно выбираемых комбинаций.

Из представленных результатов можно сделать вывод, что для некоторых численных значений параметров (8) порождающей матрицы (7) определенные пары функций имеют до 500 совпадений значений (см. светлые участки на рис. 2) на области их определения.

Темные участки над диагональю матрицы кодирования **математически** означают, что функции с указанными индексами ни при каких аргументах из отрезка $[-2^{(M-1)};\ 2^{(M-1)}-1]$ не дают одинаковые значения. Указанная ситуация приемлема для кодирования информации в системе цифровой связи. Так, например, 7-я и 11-я, 7-я и 14-я функции всегда различимы между собой, какие бы значения не выступали в качестве аргументов. **Технически** это приводит к тому, что каковы бы ни были два предыдущих значения декодируемой последовательности, информационные состояния «0110» – «1010» и «0110» – «1101» всегда декодируются корректно вне зависимости от предыдущих состояний системы. Всего таких пар функций для случая, представленного на рисунке 2:

$$\left\{\begin{array}{l} f_1(h_{k-1}, h_{k-2}),\ f_2(h_{k-1}, h_{k-2});\ \ f_1(\cdot),\ f_5(\cdot);\ \ f_2(\cdot),\ f_8(\cdot);\ \ f_3(\cdot),\ f_{10}(\cdot); \\ f_3(\cdot),\ f_{11}(\cdot);\ \ f_3(\cdot),\ f_{14}(\cdot);\ \ f_4(\cdot),\ f_{13}(\cdot);\ \ f_5(\cdot),\ f_8(\cdot);\ \ f_6(\cdot),\ f_9(\cdot); \\ f_6(\cdot),\ f_{16}(\cdot);\ \ f_7(\cdot),\ f_{11}(\cdot);\ \ f_7(\cdot),\ f_{14}(\cdot);\ \ f_9(\cdot),\ f_{12}(\cdot);\ \ f_9(\cdot),\ f_{15}(\cdot); \\ f_{10}(\cdot),\ f_{11}(\cdot);\ \ f_{10}(\cdot),\ f_{14}(\cdot);\ \ f_{12}(\cdot),\ f_{15}(\cdot);\ \ f_{12}(\cdot),\ f_{16}(\cdot);\ \ f_{15}(\cdot),\ f_{16}(\cdot) \end{array}\right\}. \qquad (9)$$

Обратим внимание, что функции f_8, f_{11}, f_{13}, f_{14} не имеют «хороших» пар с индексами, большими собственного. Матрица кодирования на рис. 2 для удобства представлена в виде возрастающих индексов первых функций пары.

Специально подчеркнем, что рис. 1 (3D-гистограмма) по оси аппликат показывает не количество пар функций, а количество пар аргументов, при которых возникает идентичный

результат как минимум у двух функций системы (6). Непосредственно ошибку декодирования данная характеристика не определяет, поскольку в вычислении отсчетов полезного сигнала дополнительно участвует информационный процесс и значения, вызывающие коллизию, как показывает численное моделирование, появляются сравнительно редко, но все же имеют место быть. Проведенный численный анализ показал, что для $Q \in [M/4;\ M]$ среднее количество коллизий для пар функций, при определенном подборе коэффициентов системы (6), не превышает трех для всех 2^{2M} комбинаций h_{k-1} и h_{k-2}.

В качестве решения указанной проблемы предлагается алгоритм кодирования информационного процесса с **адаптивным скользящим анализом результата преобразования потока данных** на передающей стороне, при котором для аргументов системы (2) проводится оценка наличия коллизий и динамически вырабатывается решение о возможности передачи того или иного информационного состояния на текущем такте работы кодера.

3. Алгоритм скользящего кодирования-декодирования информационного потока методами нелинейной динамики в системах с целочисленной арифметикой.

3.1. Скользящее кодирование (нелинейная модуляция) информационного потока. Проблему, отмеченную в п. 2 исследования можно кратко описать следующим образом: в случайные моменты времени в декодере сигнала, формируемого системой (6), возникают ситуации неоднозначного извлечения (демодуляции) информационного потока из-за совпадения результатов вычисления нескольких функций с имеющимся на текущем такте значением.

Скользящий алгоритм, исключающий передачу информации на тактах с коллизией. Предусмотреть в алгоритме кодирования исключение передачи информационного потока в моменты времени, когда возникает неоднозначность декодирования потока. Аналитически алгоритм можно представить в следующей форме:

$$h_k = \begin{cases} \mathbf{F}(h_{k-1}, h_{k-2}) = \mathbf{P} \times \begin{bmatrix} h_{k-1} \\ h_{k-2} \\ 1 \end{bmatrix}, \text{если } (f_i = f_j, i = x_k < j) \cup f_i \neq f_j,\ i \neq j; \\ \xi \neq f_i,\ i \in [1;\ 2^Q], \qquad \text{если } f_i = f_j,\ i \neq j, \end{cases} \tag{10}$$

где ξ – случайное число, не равное результату вычисления ни одной из функций на текущем такте работы кодера.

Условия вычисления первого уравнения в системе (10) требуют пояснений. В данном случае значение $f_i(h_{k-1}, h_{k-2})$ при заданном значении информационного отсчета x_k не исключается, если оно меньше, чем индекс второй функции из пары функций, вызывающих коллизию. То есть, несмотря на возникшую неоднозначность, в качестве информационного состояния декодер определит меньший индекс из пары или большего количества функций. На приемной стороне, разумеется, необходимо учесть эту особенность кодирования.

Вторая запись в системе (10) говорит о том, что в случае приема запрещенного значения демодулятор-декодер имеет возможность однозначно определить, что на данном такте информация не передается. Подобную ситуацию можно назвать передачей неинформативного отсчета («холостого» отсчета). Численное моделирование показывает, что процент потерь пропускной способности канала снижается с 10–14 % для системы (2) до 3–5 % в рассматриваемом случае в зависимости от соотношения (3).

Скользящий алгоритм, предполагающий передачу информации на тактах с коллизией. Еще большее увеличение спектральной эффективности сигнально-кодовой конструкции (2) можно получить в случае передачи информационных отсчетов в некодированном виде при выполнении определенных условий:

$$h_k = \begin{cases} \mathbf{F}(h_{k-1}, h_{k-2}) = \mathbf{P} \times \begin{bmatrix} h_{k-1} \\ h_{k-2} \\ 1 \end{bmatrix}, \text{если } (f_i = f_j, i = x_k < j) \cup f_i \neq f_j,\ i \neq j; \\ x_k \in X = \overline{1, 2^Q}, \qquad \text{если } f_i = f_j,\ i \neq j \ \cap\ x_k \neq f_i, i \in [1; 2^Q]; \\ \xi \neq \{ f_i;\ X \}, \qquad \text{если } f_i = f_j,\ i \neq j \ \cup\ x_k = f_i, i \in [1; 2^Q], \end{cases} \tag{11}$$

где X – множество возможных значений информационного потока, состоящее из последовательности значений от 1 до 2^Q.

Первое уравнение в алгоритме (11) соответствует алгоритму (10). Особого внимания требует второе выражение, придающее алгоритму кодирования информационного потока новые свойства и особенности. Предполагается, что значение x_k информационного потока на *k*-м такте может передаваться **в неизменном виде** в случае, если:

a) имеется коллизия;

b) значение x_k не равно ни одной из вычисляемых на этапе кодирования 2^Q функций.

Только в особом случае, когда выполнить условия в первых двух уравнениях системы (11) не удается, кодер принимает решение о передаче случайного значения, не принадлежащего ни множеству информационных состояний, ни соответствующему им множеству функций аргументов h_{k-1} и h_{k-2}. Согласно алгоритму определен вариант адаптивного кодера дискретного информационного потока, осуществляющего «скользящий» во времени анализ возможности однозначного извлечения информации на этапе обработки полезного сигнала. Потери пропускной способности при этом снижаются до 0–2 %, а сама система кодирования приобретает уникальные свойства, связанные с непредсказуемостью поведения системы при подаче на вход кодера даже регулярной последовательности чисел.

3.2. Скользящее декодирование (нелинейная демодуляция) информационного потока. Смесь сигнала и шума r_k на стороне приема и обработки определяется выражением:

$$r_k = s_k + n_k, \tag{12}$$

где $s_k \equiv h_k$ – нелинейно кодированная последовательность; n_k – последовательность отсчетов шумового процесса.

Алгоритмы декодирования для рассмотренных выше вариантов синтезируются непосредственно из систем уравнений (10) и (11), причем для алгоритма (10), с учетом соображений, указанных в п. 3.1, решающее правило записывается сравнительно просто:

$$x_k^* = \min(i) \mid f_i(r_{k-1}, r_{k-2}) = r_k, \tag{13}$$

где x_k^* – оценочное значение переданного состояния информационного потока.

Вертикальная черта в выражении (13) означает «при условии». Фактически декодер определяет минимальное значение индекса функции, дающей **синхронный с принятым значением отклик**. Если ни одно из значений $f_i(\cdot)$ не равно текущему состоянию на входе декодера, то информационное состояние не определяется.

Для алгоритма (11) решающее правило определяется выражением:

$$x_k^* = \begin{cases} \min(i) \mid f_i(r_{k-1}, r_{k-2}) = r_k; \\ r_k \mid r_k \in [1; 2^Q] \cap f_i(r_{k-1}, r_{k-2}) \neq r_k, i = \overline{1, 2^Q}. \end{cases} \tag{124}$$

Здесь декодер либо определяет синхронный отклик, либо выводит в качестве результата текущий отсчет, если он принадлежит множеству возможных символов информационного

потока, но не равен ни одному из рассчитанных значений порождающих функций. Если оба указанных условия не выполняются, то значение информационного символа не определяется.

Выводы и практические рекомендации.

1. В отличие от ранее полученных результатов [3–5], в системах с фиксированной точкой и конечной разрядностью нелинейные кодирующие функции реализуются естественным образом. Например, возведение в квадрат числа 26 в поле GF(256) дает результат – 92 (676 в десятичном выражении), что можно интерпретировать как «жесткий» излом функции – излом со скачком.

2. Добавление случайного числа в неопределенные моменты времени придает кодированной последовательности уникальные свойства:

– кодированная последовательность представляет собой **случайный поток чисел**;

– при передаче одной и той же последовательности информационных данных в каждом сеансе связи формируется **новая кодированная последовательность**, не имеющая статистической связи с аналогичной последовательностью, сформированной ранее.

3. Алгоритм в целом:

– является самосинхронизирующимся; по окончании блока значительных ошибок алгоритм **за два рабочих такта способен восстановить декодирующую способность** без необходимости инициализации системы или повтора передачи; как следствие, нет необходимости знать начало сеанса связи;

– имеет **малую задержку обработки** при декодировании, определяемую количеством аргументов в системе порождающих функций;

– гибок в смысле указания типа функций и величины параметров; структура функций не обязательно должна быть единой, **могут быть использованы различные порождающие функции**.

4. Если рассматривать кодер как шифратор информационного потока, то коэффициенты **P** (см. (8)) определяют ключ дешифрования. Вид функций или, в целом, их множество, определяют глобальный ключ («суперключ»). Таким образом, в отличие от известных алгоритмов шифрования, в алгоритмах (10), (11) нет единого алгоритма действий над потоком информационных данных Алгоритм работоспособен для любых типов и классов функций – в этом одно из существенных преимуществ по сравнению с известными [2–5, 9, 10].

Отметим, что в нашем случае в термин «суперключ» вкладывается иной смысл, нежели
в классической криптографии. Здесь не подразумевается возможность расшифровки данных благодаря знанию суперключа, а указывается некоторый прообраз действий, который должен осуществить декодер для корректного извлечения информации из кодированного потока.

5. Кодер вариативен: в качестве индекса, определяющего значение информационного потока, можно брать как первое, так и последнее значение. Здесь лишь важно отметить, что при практической реализации декодер-дешифратор на стороне обработки должен знать, установлен ли знак «больше» или «меньше» в условии первых уравнений (10), (11).

6. Представленные алгоритмы предполагают искусственное уменьшение пропускной способности канала связи из-за возникающих в системе кодирующих функций коллизий. Численное моделирование системы цифровой передачи информации подтвердило, что данная характеристика, в зависимости от соотношения Q/M варьируется от 0 до 5 %.

7. Для исключения возможности расшифровать передаваемое сообщение путем анализа всех возможных систем функций методом прямого перебора всех комбинаций параметров в условиях, когда информационное сообщение известно третьей стороне, предлагается в случайные моменты времени добавлять в поток случайные числа, принадлежащие отрезку $-2^{(M-1)}$; $2^{(M-1)}-1$, но не равные ни одной из кодирующих функций системы. Подход гарантированно обеспечит расхождение фазовой траектории сообщения даже в случае передачи регулярной последовательности информационных значений.

8. Приведенные примеры реализованы для систем обработки информации с 8-ю и 16-ю значащими битами. В случае увеличения разрядности имеет место бóльшая гибкость в управлении кодером и подборе типа функций.

9. Касательно методов нелинейной динамики, взятых за основу в алгоритмах (1), (2), (10) и (11), возникает терминологическая неопределенность в корректном названии процедуры преобразования. В настоящем исследовании чаще используется наиболее широкий термин – кодирование данных, однако в связи с высокой степенью нелинейного перемешивания информационного потока уместен термин «шифрование данных», поскольку в рассматриваемых задачах кодирование данных приобретает новые свойства. С другой стороны, согласно устоявшейся терминологии, касающейся методов нелинейной динамики, приведенные выше алгоритмы можно назвать методами нелинейной модуляции сигнала.

10. Следует особо отметить, что для соотношения $Q/R \le 1/4$ в рамках практической реализации алгоритма (2) имеется возможность подобрать коэффициенты порождающих функций, позволяющие на стороне обработки сигнала однозначно извлекать информацию на всем возможном множестве аргументов h_{k-1}, h_{k-2}.

THE ALGORITHM OF NONLINEAR INFORMATION CODING AND DECODING BY THE METHODS OF INTEGER TRANSFORMATIONS FOR SECURED MOBILE DIGITAL COMMUNICATION SYSTEMS

V.V. DUBROUSKI, A.I. DULKEVICH

Abstract

The article discusses the method of coding and decoding of binary information stream by the methods of non-linear dynamics in a finite field GF(N), each state in which is determined by value $M = \log_2[N]$. The proposed algorithm is defined for values with a sign and provides effective signal coding and decoding for digital communication systems. Algorithms and the results of numerical modeling are given. The fundamental possibility of self-healing the decoding ability of the signal processing device under the conditions of interference is shown.

Список литературы

1. Parsa, A. New coding scheme for the state estimation and reference tracking of nonlinear dynamic systems over the packet erasure channel (IoT) / A. Parsa, A. Farhadi // European Journal of Control. – 2021. – P. 242–252.

2. Karawanich, K. A four-scroll chaotic generator based on two nonlinear functions and its telecommunications cryptography application / K. Karawanich // International Journal of Electronics and Communications. – 2022 – Vol. 157.

3. Способы и алгоритмы информационной модуляции сигналов в беспроводных системах цифровой связи / С. И. Половеня [и др.] // Проблемы инфокоммуникаций. – 2022. – № 2 (16). – С. 13–24.

4. Illing, L. Digital communication using chaos and nonlinear dynamics / L. Illing // Nonlinear Analysis. –2009. – Vol. 71. – Iss. 12. – P. 2958–2964.

5. Sampled containment control for multi-agent systems with nonlinear dynamics / Wang Y. [et al.] // Neurocomputing. – 2017. – Vol. 219. – P. 242–247.

6. Novak, O. Decompressors using nonlinear codes / O. Novak, M. Rozkovec, J. Pliva. Microprocessors and Microsystems. – 2020. – Vol. 76.

7. Maiti, S. Generating nonlinear codes for multi-bit symbol error correction using cellular automata / S. Maiti, M. Sengupta, D. R. Chowdhury // Physica D: Nonlinear Phenomena. – 2020. – Vol. 415.

8. Xiao, S. Distributed fault-tolerant tracking control for heterogeneous nonlinear multi-agent systems under sampled intermittent communications // S. Xiao, J. Dong // Journal of the Franklin Institute. – 2021. – Vol. 358. – Iss. 17. – P. 9221–9242.

9. Дубровский, В. В. Нелинейные методы кодирования информации на основе управления характеристиками фазовых переходов / В. В. Дубровский, П. А. Тимошкин // Сборник статей Международной научно-практической конференции «Технические науки на службе созидания и прогресса». – Уфа : Аэтерна, 2017. – С. 235–237.

10. Parametric analysis of statistical and correlation characteristics of discrete processes in dynamic systems with non-stationary nonlinearities in time for the secure intent-based networks / V. Dubrouski [et al.] // Berufsakademie Sachsen University of Cooperative Education Staatliche Studienakademie Dresden − Future Intent-Based Networking (Lecture Notes in Electrical Engineering 831), 2021. – P. 242–256.

УДК 004.3 + 697.7

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ КОМПЛЕКС ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИЕЙ ЗАГОРОДНОГО ДОМА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕЛИОКОЛЛЕКТОРОВ

В.А. РЫБАК[1], И.М. РИМАРЕВ[2]

[1]*Учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», ул. П. Бровки, 5, Минск, 220013, Беларусь*
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9585-2614

[2]*Учреждение образования «Белорусская государственная академия связи», ул. Ф. Скорины, 8/2, Минск, 220076, Беларусь*
ORCID: https://orcid.org/0009-0001-9787-8084

Поступила в редакцию 10 ноября 2023

Представлены результаты исследований в области разработки и применения систем теплоснабжения удаленных загородных домов при помощи гелиоколлекторов. Показана актуальность темы для условий Республики Беларусь. Описан имеющийся потенциал и существующие решения. Предложена новая запатентованная схема гелиоводонагревательной установки. Для управления всей системой энергоснабжения разработан аппаратно-программный комплекс, анализирующий данные от различных датчиков.

Ключевые слова: гелиоколлектор, обеспечение тепловой энергией, аппаратно-программный комплекс.

Введение. В настоящее время, несмотря на бурное развитие технологий, все еще существуют случаи удаленных домов, куда прокладка линий электропередач и тепловой энергии представляется либо невозможной, либо экономически не целесообразной. Для примера можно представить горную или лесную местность, заболоченные территории, острова.

Для обеспечения энергией в подобных случаях предлагается использовать природные, возобновляемые источники – ветер и солнце. При этом солнечную энергию при помощи гелиоводоколлекторов можно преобразовывать в тепловую, а с использованием солнечных батарей – в электрическую. Подобный подход, очевидно, требует специальной системы управления, которая может быть реализована в виде аппаратно-программного комплекса.

Актуальность исследований. Вопросами использования возобновляемых источников энергии занимались многие исследователи. Так, например, Приймак А.В. в своей кандидатский диссертации в 1990 году описывал разработку рациональных, экологически чистых систем воздушного теплоснабжения, обладающих тепловой эффективностью за счет использования солнечной энергии и вторичных энергоресурсов, и воздушного коллектора солнечной энергии матричного типа с высокими теплотехническими характеристиками [1].

Можно согласиться с утверждением вышеуказанного автора о том, что основной причиной, препятствующей широкому использованию солнечной энергии для нужд теплоснабжения, является отсутствие высокоэффективного, сравнительно дешевого гелиотехнического оборудования.

В работе [2] Рутковский М.А. решает проблему разработки методик инженерного расчета для гелиосистем теплоснабжения жилых домов: «пассивного» устройства отопления здания в виде гелиосистемы воздушного отопления с естественной циркуляцией и гелиосистем горячего водоснабжения с естественной и насосной циркуляцией теплоносителя.

В результате выполненных исследований Рутковскому М.А. удалось предложить: физическую модель процесса пассивного использования солнечной энергии для нужд теплоснабжения жилых домов в Республике Беларусь, комплекс определяющих параметров для расчета КПД гелиоколлекторов, схемы гелиосистем теплоснабжения жилых домов для климатических условий и эксплуатационных особенностей в Республике Беларусь, которые позволили стабильно работать с незначительными эксплуатационными затратами.

Отмечено, что гелиосистема горячего водоснабжения состоит из гелиоколлектора, аккумулятора теплоты, системы потребления и может иметь естественную или насосную циркуляцию. Применяют гелиоколлекторы плоские и вакуумированные трубчатые. Плоские гелиоколлекторы по схеме «арфа» применяют при естественной циркуляции, а по схеме «меандр» – при насосной циркуляции ввиду их высокого гидравлического сопротивления [2].

На схеме рис. 1 показана, предложенная Рутковским М.А. для эксплуатационных условий Беларуси гелиосистема горячего водоснабжения, впервые реализованная при проектировании и возведении в г. Могилеве энергоэффективного демонстрационного десятиэтажного жилого дома в рамках Проекта Программы развития ООН и Глобального экологического фонда «Повышение энергетической эффективности жилых зданий в Республике Беларусь».

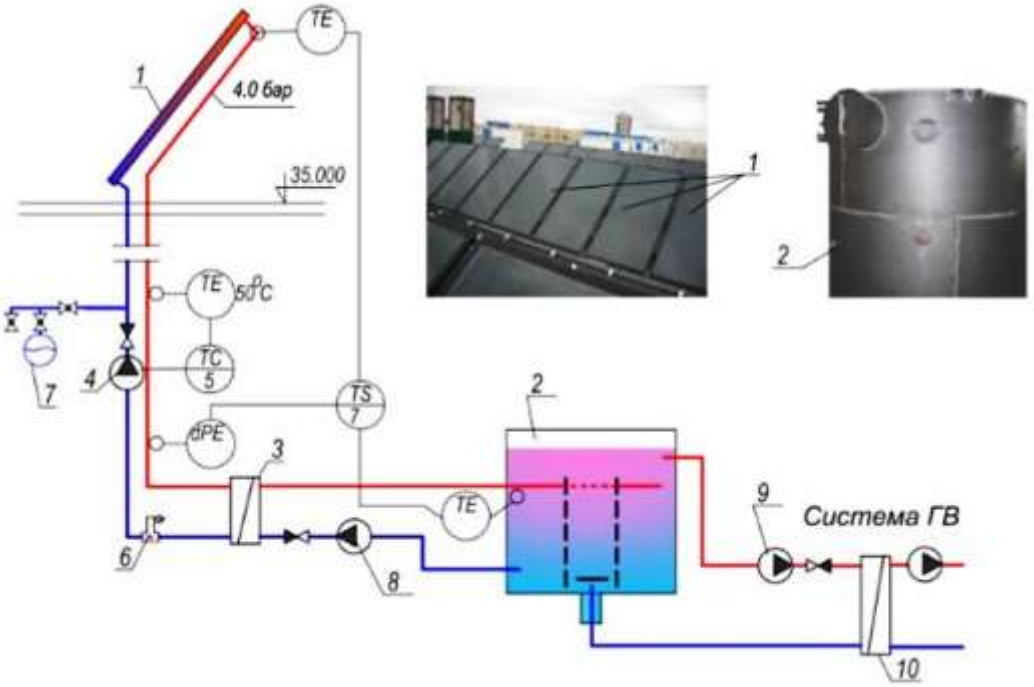


Рис. 1. Схема крупной гелиосистемы горячего водоснабжения для эксплуатационных условий Беларуси [2]:
1 – два контура гелиоколлекторов общей площадью 413 м^2 (всего 232 шт.); 2 – буферный бак-аккумулятор объемом 14,2 м^3 с функцией расширительного бака с температурным расслоением по его высоте, работающий под атмосферным давлением; 3 – скоростной теплообменник между гелиоконтуром и теплоносителем бака-аккумулятора; 4 – насос с плавным изменением частоты вращения под действием электронного регулятора; 6 – воздушный фланцевый сепаратор; 7 – мембранный расширительный бак и система автоматической подпитки; 8, 9 – циркуляционные насосы контуров теплоносителя бака-аккумулятора; 10 – скоростной теплообменник между контуром теплоносителя бака-аккумулятора и системой горячего водоснабжения

В своих исследованиях, результаты которых представлены ниже, мы также предложили гелиоводоколлектор для обеспечения тепловой энергией загородного дома.

Заканчивая обоснование актуальности данного направления, обратимся к работе [3], в которой Камлюк Г.Г. изложил свое видение гелиоэнергетических ресурсов и перспектив развития гелиоэнергетики в Республике Беларусь. При этом из солнечной энергии, приходящей на каждый квадратный метр земной поверхности, можно получить в среднем около 1050 кВт/ч в год, что соответствует ежегодному потреблению электроэнергии одним человеком.

Приход суммарной солнечной радиации в виде накопленных в течение года сумм на территории Республики Беларусь находится в пределах от 3800 МДж/м^2 по северо-востоку страны до 4100 МДж/м^2 и выше по северо-западу, югу и юго-востоку.

Продолжительность солнечного сияния, по данным Республиканского гидрометеоцентра, составляет от 1730–1750 ч в Гродненской до 1855–1870 ч в Гомельской областях в год.

В статье [3] отмечается, что для Республики Беларусь целесообразны три варианта использования солнечной энергии: для целей горячего водоснабжения и отопления с помощью солнечных коллекторов, для строительства домов на принципах «солнечной архитектуры», для производства электроэнергии с помощью фотоэлектрических установок.

Таким образом, тема использования солнечной энергии для выработки тепловой и электрической энергии в Республике Беларусь достаточно актуальна.

Разработка усовершенствованной гелиоводонагревательной установки. Для решения поставленных нами задач (в частности, для обеспечения удаленного загородного дома тепловой энергией) был проведен патентный поиск и предложена новая конструкция, имеющая отличительные особенности.

Предлагаемое техническое решение относится к гелиоводонагревательным установкам, которые осуществляют нагрев холодной воды солнечной энергией, преобразованной установками в теплоту.

Известна конструкция гелиоводонагревательной установки [4], которая содержит насос, плоский гелиоколлектор и бак-аккумулятор горячей воды, который входом холодной воды подключен к водопроводу холодной воды, а к его выходу горячей воды подключены потребители горячей воды, при этом выход холодной воды бака-аккумулятора горячей воды через насос и плоский гелиоколлектор присоединен к его входу горячей воды.

Эта гелиоводонагревательная установка работает следующим образом. Насос забирает из нижней зоны бака-аккумулятора горячей воды холодную воду и подает ее через плоский гелиоколлектор и вход горячей воды этого бака обратно в бак-аккумулятор горячей воды. При движении холодной воды по трубам плоского гелиоколлектора она нагревается теплотой, в которую преобразует плоский гелиоколлектор падающее на него солнечное излучение.

К недостатку этой гелиоводонагревательной установки следует отнести пониженную эффективность работы.

Пониженная эффективность работы гелиоводонагревательной установки обусловлена большими потерями теплоты плоским гелиоколлектором в окружающую среду, в результате чего увеличивается время нагрева воды до нормируемой температуры (+60 °С), содержащейся в баке-аккумуляторе горячей воды.

Ближайшей по конструкции к заявляемой конструкции гелиоводонагревательной установки является гелиоводонагревательная установка, обладающая большей эффективностью работы [5].

Эта гелиоводонагревательная установка содержит насос, вакуумный гелиоколлектор и бак-аккумулятор горячей воды, который входом холодной воды подключен к водопроводу холодной воды, а к его выходу горячей воды подключены потребители горячей воды, при этом выход холодной воды бака-аккумулятора через вакуумный насос и гелиоколлектор присоединен к его входу горячей воды.

Эта гелиоводонагревательная установка работает следующим образом. Насос забирает холодную воду из нижней зоны бака-аккумулятора горячей воды и через вакуумный насос и гелиоколлектор подает ее обратно в бак-аккумулятор горячей воды. При движении холодной воды по теплопередающим трубам с черными покрытиями, которые расположены соосно и с кольцевыми зазорами внутри вакуумных светопрозрачных стеклянных труб, она нагревается теплотой, в которую теплопроводящие трубы с черными покрытиями преобразуют падающее на них через вакуумные светопрозрачные стеклянные трубы солнечное излучение.

Гелиоводонагревательная установка обладает высокой эффективностью работы из-за малых потерь теплоты в наружную среду вакуумным гелиоколлектором. К недостатку гелиоводонагревательной установки следует отнести снижение эффективности работы в осенний период года.

Снижение эффективности работы гелиоводонагревательной установки в осенний период года обусловлено образованием на наружной поверхности вакуумных светопрозрачных стеклянных труб гелиоколлектора слоя снега-льда, в результате чего уменьшается величина солнечного излучения, падающего на черные поверхности теплопроводящих труб гелиоколлектора, и, следовательно, уменьшается тепловая мощность, вызывающая нагрев холодной воды, проходящей через вакуумный гелиоколлектор.

Технической задачей заявляемого изобретения гелиоводонагревательной установки является повышение эффективности ее работы в осенний период года путем удаления слоя снега-льда, образующегося на наружных поверхностях светопрозрачных стеклянных труб вакуумного гелиоколлектора установки.

Поставленная техническая задача решается тем, что гелиоводонагревательная установка, содержащая насос, вакуумный гелиоколлектор и оборудованный электронагревателем бак-аккумулятор горячей воды, подключенный входом холодной воды к водопроводу холодной воды, к выходам горячей и холодной воды которого соответственно подключены потребители горячей воды и вход насоса, дополнительно снабжена проточным электроводонагревателем и краном с байпасом, при этом выход насоса через проточный электроводонагреватель, вакуумный гелиоколлектор и кран с байпасом присоединен ко входу горячей воды бака-аккумулятора горячей воды.

Сущность заявляемого изобретения гелиоводонагревательной установки поясняется следующими графическими изображениями:

на рис. 2 изображена функциональная схема гелиоводонагревательной установки;

на рис. 3 – конструкция вакуумного гелиоколлектора установки, вид сверху.

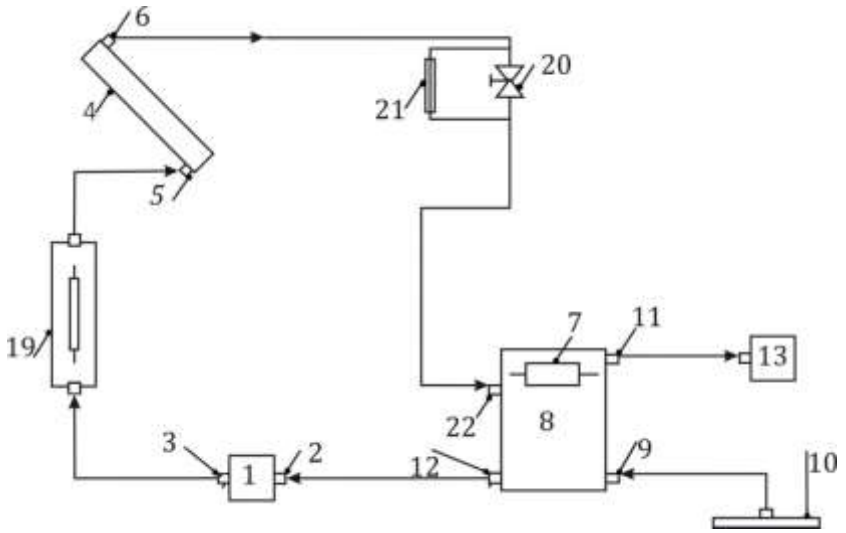


Рис. 2. Функциональная схема гелиоводонагревательной установки

Заявляемая гелиоводонагревательная установка содержит: насос (1), оборудованный входом (2) и выходом (3) для холодной воды; вакуумный гелиоколлектор (4) со входом (5) и выходом (6) для холодной и горячей воды; оборудованный электронагревателем (7) бак-аккумулятор (8) горячей воды, подключенный выходом (9) холодной воды к водопроводу (10) холодной воды, к выходам (11), (12) горячей и холодной воды которого соответственно подключены потребители (13) горячей воды и входом (2) холодной воды насос (1).

Вакуумный гелиоколлектор (4) с входом (5) и выходом (6) для холодной и горячей воды (рис. 3), применяемый в гелиоводонагревательной установке, содержит высокопрочную раму (14), в которой расположены с черными покрытиями теплопроводящие трубы (15),

размещенные соосно и с кольцевыми зазорами внутри вакуумных светопрозрачных стеклянных труб (16) и присоединенные входами и вsходами к распределительному и собирающему коллекторам (17), (18) холодной и горячей воды.

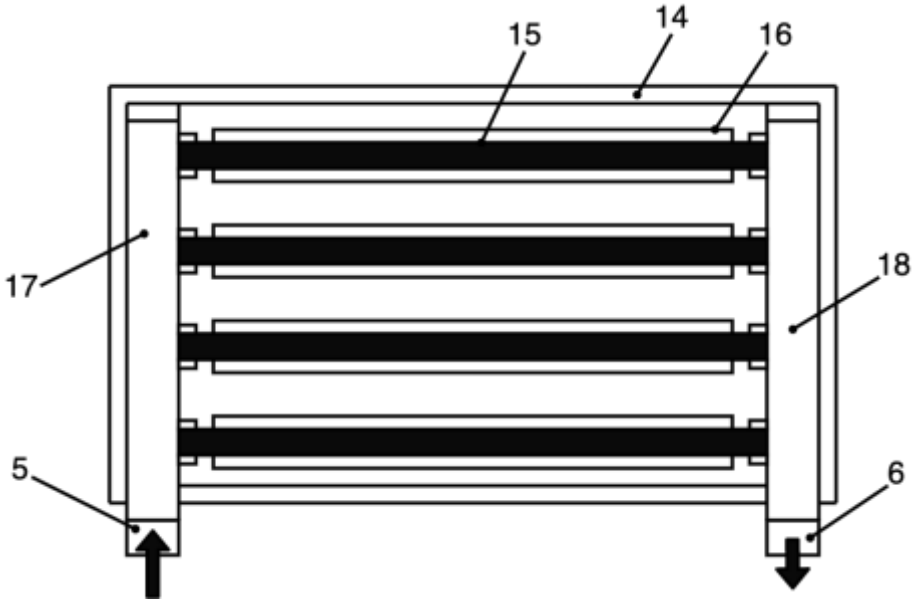


Рис. 3. Конструкция вакуумного гелиоколлектора установки, вид сверху

Для повышения эффективности работы гелиоводонагревательной установки в осенний период года путем удаления снега-льда с наружных поверхностей светопрозрачных стеклянных труб (16) вакуумного гелиоколлектора (4) она дополнительно снабжена проточным электроводонагревателем (19) и краном (20) с байпасом (21), при этом выход (3) холодной воды насоса (1) через проточный электроводонагреватель (19), вакуумный гелиоколлектор (4) и кран (20) с байпасом (21) присоединен ко входу (22) горячей воды бака-аккумулятора (8) горячей воды.

Заявляемая гелиоводонагревательная установка работает следующим образом.

В теплый период года для нагрева холодной воды, находящейся в баке-аккумуляторе (8) горячей воды, при неработающем проточном электроводонагревателе (19) электронный блок управления вводит в работу насос (1), который забирает холодную воду из нижней зоны бака-аккумулятора (8) горячей воды и через проточный электроводонагреватель (19), вакуумный гелиоколлектор (4), открытый кран (20) и байпас (21) подает ее обратно в бак-аккумулятор (8) горячей воды.

При движении воды по теплопроводящим трубам (15) с черными покрытиями она нагревается теплотой от подающего на них солнечного излучения.

Так как теплопроводящие трубы с черными покрытиями (15) размещены соосно и с кольцевыми зазорами внутри вакуумных светопрозрачных стеклянных труб (16), то вакуумный гелиоколлектор имеет малые потери теплоты в окружающую среду и его КПД достигает 95 %.

Если за дневное время гелиоводонагревательная установка не нагреет воду до +60 °С, то осуществляют дополнительный нагрев воды перед подачей ее потребителям (13) при помощи электронагревателя (7).

В осенний период в ряде случаев на наружных поверхностях светопрозрачных стеклянных труб (16) образуется слой снега-льда из-за чего уменьшается эффективность работы гелиоводонагревательной установки так как не все солнечное излучение падает на черные поверхности теплопроводящих труб (15) и поэтому уменьшается нагрев воды, идущей по этим трубам.

Для удаления снега-льда со светопрозрачных стеклянных труб (16) закрывают кран (20) и подключают к электросети проточный электроводонагреватель (19). При этом с закрытием

крана (20) уменьшается резко расход воды через теплопроводящие трубы (15) с черными покрытиями и проточный электроводонагреватель (19) нагревает проходящую через него воду до температуры 90…95 °С. Вода с этой температурой поступает в теплопроводящие трубы (15). При движении горячей воды по теплопроводящим трубам (15) она отдает часть своей теплоты излучением через светопрозрачные стеклянные трубы (16) слою снега-льда, находящегося на наружных поверхностях этих труб, который преобразует тепловое излучение в тепловую энергию, которая и вызывает таяние слоя снега-льда.

После удаления слоя снега-льда с наружных поверхностей светопрозрачных стеклянных труб (16) вакуумного гелиоколлектора (4) прекращают работу проточного электроводонагрвевателя (19), открывают кран (20) и гелиоводонагревательная установка продолжает работу, как и в теплый период.

Таким образом, в процессе эксплуатации заявляемой гелиоводонагревательной установки происходит достижение поставленной технической задачи – повышение эффективности работы гелиоводонагревательной установки в осенний период путем удаления слоя снега-льда с наружных поверхностей светопрозрачных стеклянных труб вакуумного гелиоколлектора за счет снабжения установки проточным электроводонагревателем и краном с байпасом и присоединения выхода холодной воды насоса через проточный электроводонагреватель, вакуумный гелиоколлектор и кран с байпасом ко входу горячей воды бака-аккумулятора горячей воды.

Для сопряжения предложенной установки гелиоводонагревателя с общей системой обеспечения загородного дома энергией нами предложена автоматизированная система, основой которой является микрокомпьютер Raspberry Pi, осуществляющий сбор и обработку сигналов от имеющихся датчиков.

К основным функциям системы управления относится: корректировка углов наклона солнечных панелей (рис. 4), регулировка давления в системе водоснабжения, переключение системы в режим энергосбережения и др.

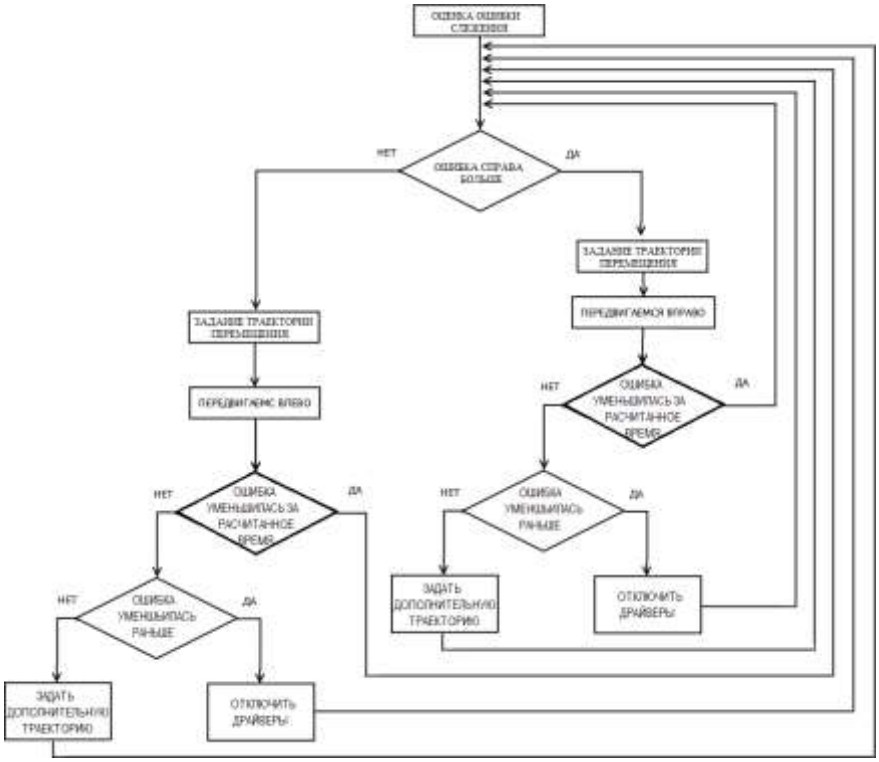


Рис. 4. Алгоритм коррекции траектории слежения

На последующих этапах нами планируется использовать нейронные сети и теорию нечетких множеств для построения нейро-нечеткой модели управления, которая позволит

частично учитывать неопределенность данных, и повысить эффективность функционирования всей системы энергоснабжения.

Заключение. По результатам проведенных исследований было показано, что тема разработки и использования гелиоколлекторов достаточно актуальна для Республики Беларусь. Несмотря на наличие уже внедренных решений, вопрос обеспечения удаленных домов тепловой и электрической энергией остается открытым.

Нами предложена и запатентована новая схема гелиоводоколлектора, отличающаяся повышенной эффективностью в реальных погодных условиях нашей страны [6].

Для управления снабжением загородного дома тепловой и электрической энергией разработан аппаратно-программный комплекс, который в автоматическом режиме корректирует наклон осей солнечных панелей, регулирует давление в системе водоснабжения и др.

AUTOMATED COMPLEX FOR PROVIDING THERMAL ENERGY FOR A COUNTRY HOUSE USING SOLAR COLLECTORS

V.A. RYBAK, I.M. RIMAREV

Abstract

The results of research in the field of development and application of heat supply systems for remote country houses using solar collectors are presented. The relevance of the topic for the conditions of the Republic of Belarus is shown. The existing potential and existing solutions are described. A new patented design for a solar water heating installation has been proposed. To control the entire energy supply system, a hardware and software complex has been developed that analyzes data from various sensors.

Список литературы

1. Приймак, А. В. Гелиосистема теплоснабжения с воздушным коллектором солнечной энергии матричного типа : автореф. дис. … канд. техн. наук / А. В. Приймак. – Киев, 1990. – 10 с.

2. Рутковский, М. А. Гелиосистемы теплоснабжения жилых зданий в условиях Беларуси : автореф. дис. … канд. техн. наук / М. А. Рутковский. – Минск, 2017. – 24 с.

3. Камлюк, Г. Г. Гелиоэнергетические ресурсы и перспективы развития гелиоэнергетики в Республике Беларусь / Г. Г. Камлюк // Энергетическая стратегия. – 2012. – № 6 (30). – С. 35–37.

4. Системы солнечного тепло-хладоснабжения / Р. Р. Авезов [и др.] ; под. ред. Э. В. Сарницкого, С. А. Чистовета. – М. : Стройиздат, 1990. – 328 с.

5. Системы подогрева воды в системе горячего водоснабжения при помощи солнечной энергии / Gaylen Atkinson, Tom Colvin ; перевод и техническое редактирование выполнены Н. А. Шониной. – М. : Сантехника. – 2015. – № 3. – С. 10–16.

6. Гелиоводонагревательная установка : изобретение BY 23792 / В. А. Рыбак, И. М. Римарев, Аль-Аркауази Али. – Опубл. 31.05.2022.

УДК 654.078;004

АНАЛИЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ BIG DATA В КОНЦЕПЦИИ УМНОГО ГОРОДА

О.П. РЯБЫЧИНА[1], О.Р. ХОДАСЕВИЧ[2], О.Ю. ГОРБАДЕЙ[3]

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

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

[3]*Учреждение образования «Белорусская государственная академия связи», ул. Ф. Скорины, 8/2, Минск, 220076, Беларусь*
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2209-7160

Поступила в редакцию 6 июля 2023

Представлены результаты анализа использования Big data (больших данных) в рамках концепции «умного города». Рассмотрены способы применения данной технологии для решения задач в рамках «умного города». Предложен алгоритм построения модели взаимодействия применения Big data в системе «умный город», приведены примеры технологий, которые могут использоваться для создания модели такого взаимодействия.

Ключевые слова: умный город, большие данные, цифровая трансформация, цифровизация, Интернет вещей.

Введение. «Умный город» является одной из ключевых частей цифровизации экономики [1]. Города растут быстрыми темпами и представляют собой сложные системы, и их анализ уже невозможен без применения современных технологий. Одним из способов развития концепции «умного города» является внедрение технологии Big data. Идея заключается в анализе информации от множества различных датчиков; сенсоров; камер, которыми наполнен город; специальными алгоритмами, что позволяет оптимизировать процессы развития города.

Приоритет внедрения и развития технологий «умных городов» в решении задач цифровой трансформации национальной экономики определен в настоящее время несколькими основными программно-стратегическими документами в сфере социально-экономического развития Республики Беларусь. Так в соответствии с Указом Президента Республики Беларусь от 7 мая 2020 г. № 156 «О приоритетных направлениях научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021–2025 годы» технологии «умного города» определены одним из приоритетных направлений [2].

В целях реализации концепции «Умный город» предполагается активизация работы по развитию цифровых технологий во всех регионах, внедрение региональной государственной типовой цифровой платформы «Умный город (регион)» в городе Минске, областных центрах, городах и районах с численностью населения 80 тыс. человек и более, обеспечение на их базе сервисов в различных сферах жизнедеятельности и управления [3].

Механизмом реализации работы по развитию технологий «умных городов» во всех регионах выступает проект «Умные города Беларуси», который с учетом масштабности и значимости включен в перечень «проектов будущего» Республики Беларусь [4].

Области применения Big Data в концепции «умного города». Технологии «умного города» используют разнообразные специализированные датчики и подключенные устройства для сбора, анализа данных и принятия решений. Решения для Big data обеспечивают административный контроль для больших объемов данных, включая хранение, резервное копирование, анализ и визуализацию. Системы больших данных в значительной мере повышают эффективность сложной инфраструктуры данных.

Необходимо отметить, что Big data имеют следующие основные черты: большой объем информации, быстрая скорость изменения информации и разнообразие обрабатываемых данных. На рис. 1 показаны основные компоненты, из которых состоит аналитика больших данных [5].

Рис. 1. Элементы аналитики больших данных

На данный момент существует множество способов применения Big data для решения задач в концепции «умного города». Так, анализ больших данных активно используется в следующих сферах:

– Усовершенствование городской инфраструктуры. Big data может использоваться для улучшения городской инфраструктуры, в том числе дорог, мостов, транспортной системы, водо- и энергоснабжения и других. Для этого необходимо собрать данные о состоянии городской инфраструктуры, включая ее износ, места частых аварий, наиболее используемые маршруты и т. д. После этого можно использовать аналитические инструменты для выявления проблемных участков и планирования их ремонта или модернизации.

– Оптимизация городской транспортной системы. Big data может использоваться для оптимизации городской транспортной системы, включая расписание общественного транспорта, управление светофорами и прогнозирование трафика. Для этого необходимо собрать данные о движении транспорта, пассажиропотоке, погодных условиях и т. д. После этого можно использовать аналитические инструменты для определения оптимальных маршрутов, расписания движения транспорта и управления светофорами. Такая модель позволит

оптимизировать работу городского транспорта, сократить время в пути для пассажиров и уменьшить загрузку дорог, улучшить логистику доставки грузов.

– Повышение качества городских служб. Big data может использоваться для улучшения услуг городских служб, включая уборку городских улиц, сбор мусора и поддержания в порядке дворовых территорий. Для этого необходимо собрать данные о состоянии городской инфраструктуры, погодных условиях, пассажиропотоке и других факторах. После этого можно использовать аналитические инструменты для определения оптимальных маршрутов уборки, оптимизации графика сбора мусора и планирования ремонтных работ.

– Повышение качества здравоохранения. В [6] было предложено несколько решений, которые должны быть приняты в области здравоохранения, используя анализ больших данных для улучшения жизни госпитализированных пациентов. Например, системы мониторинга в режиме реального времени могут собирать данные (характер сна, уровень холестерина, артериальное давление и др.) с помощью интеллектуальных устройств и напрямую обмениваться данными с ИТ-системами больницы, чтобы интегрировать всестороннюю историю болезни пациента и обеспечить своевременное реагирование на возможные проблемы со здоровьем. Структура профилактических и персонализированных медицинских услуг использует пограничные вычисления, машинное обучение, большие данные, высокопроизводительные вычисления HPC и Интернет вещей. На основе этих предложений был спроектирован и разработан робот скорой помощи, который оснащен автоматическим внешним дефибриллятором для облегчения ручного и/или автономного функционирования, оперативного реагирования на случаи остановки сердца и спасения жизней людей в больнице «умного города».

– Управление энергетическими системами. Big data выгодно использовать для решения проблем энергопотребления, которые становятся все более и более важными из-за явления быстрой урбанизации. Крупные города нуждаются в растущих запросах на энергию, а ученые и инженеры постоянно работают над созданием технологических решений для энергоэффективных инфраструктур с целью снижения затрат на энергию в масштабах города и сокращения энергопотребления. Существуют модели, которые могут прогнозировать периоды высокого или низкого спроса на энергию или временные окна, обеспечивающие высокую доступность возобновляемой энергии. Такие знания могут способствовать более эффективному и действенному использованию энергии в городской и пригородной среде, а также при наличии ограничений, связанных с использованием энергии, установленных в административном порядке.

– Управление кризисными ситуациями. Big data может использоваться для управления кризисными ситуациями, включая наводнения, пожары и теракты. Для этого необходимо собирать и анализировать данные с камер наблюдения с привязкой к их местоположению, информацию о погодных условиях.

– Оптимизация процессов газоснабжения. Big data может использоваться для сбора данных о расходе газа в городе и прогнозирования его потребления. На основе полученных данных можно создать модель управления газоснабжением, которая будет учитывать сезонные колебания потребления газа и позволит оптимизировать работу газовых сетей, сократить потери газа и уменьшить затраты на эксплуатацию системы.

– Управление отходами. Big data можно использовать для сбора данных о производстве и расходе отходов в городе. На основе полученных данных можно создать модель управления отходами, которая будет учитывать места, где наибольшее количество отходов, и оптимизировать сбор и утилизацию их в городе. Такая модель позволит сократить количество отходов, оптимизировать их переработку, уменьшить нагрузку на свалки и улучшить экологическую ситуацию в городе.

– Учет гражданских жалоб. С помощью Big data можно собрать и проанализировать данные о жалобах горожан на различные проблемы в городе, такие как перегруженность дорог, недостаток парковок, плохое качество водоснабжения и т. д. На основе полученных данных можно создать модель взаимодействия жителей с городскими властями и принимать срочные меры для устранения проблем, улучшения условий жизни горожан и повышения уровня их доверия к властям.

На рис. 2 представлена общая схема по сбору и обработке Big data в системе «умный город».

Таким образом, развитие технологии Big data может позволить отследить долгосрочные тенденции и перспективы развития мегаполисов.

Исходя из опыта использования систем управления базами данных, а также проведения количественного и статистического анализа, может быть предложен следующий алгоритм построения модели взаимодействия применения Big data в системе «умный город»:

1. Формулировка целей и задач системы. Необходимо четко определить, какие задачи нужно решить при создании модели взаимодействия и применении Big data в «умном городе». Например, повышение уровня жизни горожан, оптимизация городской инфраструктуры, улучшение безопасности и т. д.

2. Сбор необходимых данных. Для создания модели взаимодействия и использования Big data нужно собрать все возможные данные о городе и его жителях. Это могут быть данные о дорожной сети, транспорте, транспортных потоках, ландшафте, архитектуре, климате, экологии, демографии и пр.

3. Анализ данных. Полученные данные нужно проанализировать, чтобы выявить связи, закономерности и проблемы. Это позволит определить, какие данные нужно использовать для создания модели взаимодействия и применения Big data в «умном городе».

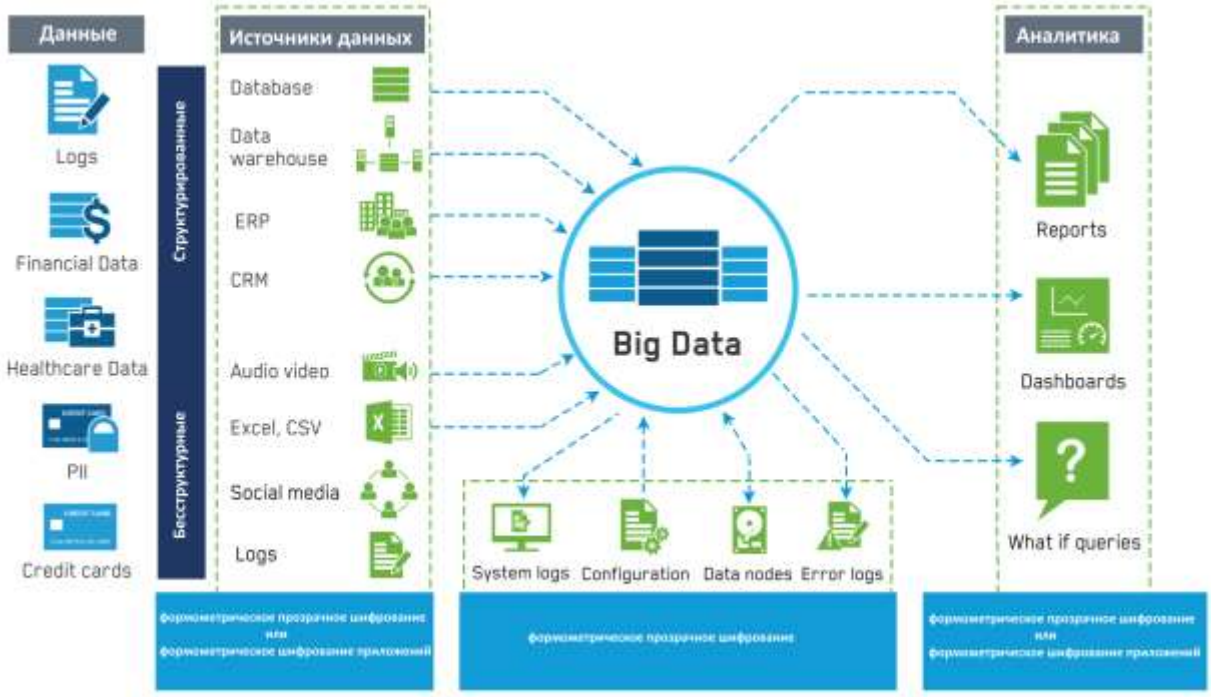


Рис. 2. Схема сбора и обработки Big data в системе «умный город»

4. Разработка модели взаимодействия. На основе анализа данных нужно разработать модель взаимодействия, которая будет учитывать все особенности «умного города». Например, это может быть модель взаимодействия жителей с городской инфраструктурой, модель управления транспортными потоками и т. д.

5. Реализация модели с помощью Big data. Для реализации модели необходимо создать систему сбора и обработки данных с помощью Big data. Это позволит использовать большие объемы данных и быстро обрабатывать их для выявления проблем и принятия решений.

6. Тестирование и оптимизация модели. После создания модели и ее реализации необходимо провести тестирование и оптимизацию. Это поможет выявить ошибки и недостатки и улучшить работу системы.

7. Применение модели в практике. Как только модель будет готова к использованию, ее можно применять в практике. Это поможет улучшить жизнь горожан, оптимизировать городскую инфраструктуру и повысить безопасность.

Для реализации описанного алгоритма и анализа огромных объемов данных, генерируемых в результате человеческой деятельности и функционирования различных объектов, необходимо создание соответствующей платформы, которая будет использовать данные, собираемые из большого числа источников, накапливать их, обрабатывать и давать рекомендации по возможным действиям. Такая платформа позволит разрабатывать на ее основе конкретные целенаправленные предложения, например, решать задачи городского планирования, управлять дорожным движением или предоставлять гражданам различные услуги, такие как информирование о дорожном трафике или загрязнении окружающей среды в реальном режиме времени.

Однако создание «с нуля» системы, собирающей и обрабатывающей огромные объемы данных в реальном времени, требует значительных инвестиций и ресурсов. Поэтому компании, разрабатывающие собственные решения и сервисы для «умного города», могут воспользоваться уже имеющимися технологиями, облачными сервисами и необходимыми результатами аналитики. Это является быстрым и относительно недорогим способом получения результатов анализа данных.

Приведем примеры технологий, которые могут использоваться для создания модели взаимодействия и применения Big data в «умном городе»:

Hadoop – открытая платформа для хранения и обработки больших объемов данных, которая может использоваться для создания системы сбора и обработки данных в «умном городе».

Spark – фреймворк для обработки больших объемов данных, который позволяет быстро анализировать и обрабатывать данные в режиме реального времени. Spark может использоваться для создания модели взаимодействия в «умном городе», управления транспортными потоками и других задач.

MongoDB – база данных, которая может использоваться для хранения и обработки структурированных и неструктурированных данных в «умном городе». MongoDB может быть полезной для создания системы управления транспортными потоками, системы сбора и анализа данных о производстве и расходе отходов, системы учета гражданских жалоб и т.д.

Machine Learning – технология, которая может использоваться для создания моделей прогнозирования поведения горожан, анализа данных о погоде, трафике, экологии и других параметрах, а также для оптимизации работы городских инфраструктур и улучшения жизни горожан.

IoT (интернет вещей) – технология, которая позволяет собирать данные с помощью датчиков и других устройств, которые могут быть установлены в городской инфраструктуре. Собранные данные могут быть использованы для создания модели взаимодействия и оптимизации работы городских инфраструктур.

В качестве примера можно привести компанию Fujitsu, которая разработала цифровую инфраструктуру SPATIOWL, поддерживающую множество сервисов и служб на основе обработки больших данных. Одна из них – служба безопасности дорожного движения, в частности – информирование о скользкой дороге. Многие современные автомобили имеют системы АБС и электронной стабилизации, выдающие сотни результатов измерений. Эти данные поступают в мощную аналитическую платформу на базе Hadoop. Анализ таких данных помогает дать советы по вождению на скользкой дороге, а с учетом геолокации автомобиля – выявить особенно опасные участки. Все водители с подключенными к системе SPATIOWL устройствами при приближении к таким участкам дороги получают соответствующее предупреждение [6].

Другим показательным примером является Лос-Анджелес, где все городские светофоры объединены в саморегулирующуюся систему. Камеры видеонаблюдения через IoT-датчики передают информацию в единый вычислительный центр, где с помощью алгоритмов машинного обучения анализируется дорожная ситуация. В результате сигналы светофора на всех крупных перекрестках регулируются динамически, в зависимости от загруженности дорог. После внедрения этой системы, основанной на взаимодействии Big data и Machine Learning, средняя скорость движения в городе увеличилась на 16 %, а время ожидания в пробках – сократилось на 12 %. Реализация единой системы «умных светофоров» заняла почти 30 лет и стоила около $400 миллионов [7].

Кроме этого возникает еще одна проблема – где этим технологиям хранить свои данные. «Умным городам» для правильной работы требуется огромное количество архивных данных и данных в реальном времени. Как отмечалось выше, источниками данных могут быть автономные и умные автомобили, которые все больше интегрируются с мобильными системами. В результате автомобили могут общаться друг с другом и с «умным городом». Эта связь может уменьшить заторы, предотвратить дорожные происшествия и улучшить навигацию. Данные систем камер видеонаблюдения, которые помогают в обеспечении соблюдения правил дорожного движения, повышении общественной безопасности, построении интеллектуальных систем освещения и служат в качестве детектора преступлений. Данные датчиков окружающей среды: датчики качества воздуха позволяют городам находить загрязнителей и принимать меры против них, определять местонахождение зеленых зон с низким качеством воздуха и предоставлять горожанам оповещения о состоянии качества воздуха.

«Умные города» могут хранить свои данные в трех основных местах:

Облачное хранилище. «Умным городам» требуются большие объемы данных для аналитических целей. Системы облачных данных используют твердотельные накопители в своих центрах обработки данных, удаляют избыточные данные и шифруют передачу данных. Облачные решения обычно имеют более гибкие способы оплаты, чем локальные центры обработки данных.

Пограничные вычисления. Пограничные вычисления позволяют обрабатывать данные как можно ближе к их источнику. Пограничные вычисления могут быть дешевле, чем потоковая передача данных в удаленное хранилище, а затем в соответствующие городские службы. В некоторых городах уже разрабатываются функции граничных вычислений, такие как управление трафиком с использованием искусственного интеллекта (ИИ). Управление трафиком с помощью ИИ использует интеллектуальную автоматизацию для обнаружения пробок и аварий, а также более быстрого реагирования на различные условия [8].

Гибридное хранилище данных. Гибридные системы хранения данных сочетают в себе преимущества облачных и периферийных хранилищ. Гибридное хранилище данных позволяет городам принимать новые решения на основе оповещений в режиме реального времени.

Таким образом, становится очевидно, что инфраструктура «умного города» со стороны цифрового обеспечения является очень сложной аппаратно-программной системой. Каждое из используемых устройств в результате своей работы порождает огромное количество данных, которые требуется собирать, анализировать и передавать между информационными системами, функцию чего и выполняют в данном случае технологии Big data.

Заключение. Big data играет важную роль в реализации концепции «умного города». Цифровые платформы города могут обрабатывать данные с устройств и датчиков Интернета вещей, чтобы распознавать закономерности явлений и потребности жителей. Анализ данных может повлиять на множество факторов жизни города – от снижения количества дорожно-транспортных происшествий и заторов, помощи водителям найти место для парковки до снижения уровня преступности, улучшения интеллектуального городского освещения и улучшения систем водоснабжения и энергетики. Администрации городов вкладывают большие средства для превращения города в «умный город». Эти инвестиции могут быть использованы либо для построения новых систем, либо реконструкции уже существующих. Анализ больших данных может подсказать, какие области требуют преобразований и какого рода преобразований. В результате города могут делать специальные инвестиции в необходимые области. Таким образом, анализ больших данных является ключевой движущей силой современного «умного города».

ANALYSIS OF THE DIGITAL TRANSFORMATION TRENDS IN THE TELECOMMUNICATIONS INDUSTRY

O.P. RYABYCHINA, O.R. KHODASEVITCH, O.Y. GORBADEY

Abstract

The results of the analysis of the Big data using within the concept of a smart city are presented. The ways of using of this technology to solve problems within the framework of a smart city are considered. An algorithm for constructing an interaction model for using Big data in a smart city system is proposed, examples of technologies that can be used to create a model for such interaction are given.

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. Указ Президента Республики Беларусь от 7 мая 2020 г. № 156 «О приоритетных направлениях научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021–2025 годы» [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://pravo.by/document/?guid=3961&p0=P32000156. – Дата доступа : 01.04.2023.

3. Программа деятельности Правительства Республики Беларусь на период до 2025 года [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C22000758&p1=1&p5=0. – Дата доступа : 01.04.2023.

4. План мероприятий по реализации комплексного «проекта будущего» «Умные города Беларуси» [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://www.mpt.gov.by/sites/default/files/plan_po_umnim_gorodam.pdf. – Дата доступа : 01.04.2023.

5. Big Data: перспективы развития, тренды и объемы рынка больших данных [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://delprof.ru/press-center/open-analytics/big-data-perspektivy-razvitiya-trendy-i-obemy-rynka-bolshikh-dannykh/. – Дата доступа : 03.05.2023.

6. Eiman Al Nuaimi, Hind Al Neyadi. Applications of big data to smart cities [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://jisajournal.springeropen.com/articles/10.1186/s13174-015-0041-5. – Дата доступа : 04.05.2023.

7. «Умные города» и Большие Данные [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://habr.com/ru/company/fujitsu/blog/258925/. – Дата доступа : 03.04.2023.

8. Как Big Data с Machine Learning борются с пробками и улучшают дороги [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://bigdataschool.ru/blog/big-data-machine-learning-iot-transport-traffic.html. – Дата доступа : 20.05.2023.

УДК 621.391

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В БЕСПРОВОДНЫХ ОПТИЧЕСКИХ КАНАЛАХ СВЯЗИ

С.И. ПОЛОВЕНЯ[1], А.Н. ПЫТЕЛЬ[2]

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

[2]*Учреждение образования «Белорусская государственная академия связи»,*
ул. Ф. Скорины, 8/2, Минск, 220076, Беларусь
ORCID: https://orcid.org/0009-0007-9039-1103

Поступила в редакцию 17 ноября 2023

Рассматриваются возможность применения нейронных сетей в системах передачи данных видимым светом, характеристики оптической связи в свободном пространстве, структурные схемы линий оптической связи в свободном пространстве, а также предлагаемая структура нейроконтроллера с многослойной моделью персептрона; предложена архитектура блока нейроконтроллера.

Ключевые слова: атмосферные оптические линии связи, связь по видимому свету, Li-Fi.

Введение. Одной из самых популярных технологий передачи данных по беспроводным оптическим каналам является технология оптической связи в свободном пространстве (АОЛС – атмосферные оптические линии связи), предназначенная для высокоскоростной передачи цифрового сигнала при помощи инфракрасного излучения между двумя точками-модулями по воздуху. Для организации оптической беспроводной связи на небольшие расстояния используется технология связи по видимому свету (СВС) или при двунаправленной передаче – Li-Fi (Light Fidelity).

Li-Fi использует спектр видимого света или инфракрасный спектр и предлагает значительно более высокий уровень защиты и безопасности, а также высокую скорость, низкую задержку и надежность. Для передачи используются светодиоды освещения помещения, что позволяет назвать Li-Fi «зеленым» методом связи. Данные передаются за счет изменения интенсивности света, невидимого человеческому глазу.

Характеристики оптической связи в свободном пространстве (ОССП).

Основные свойства:

1. Направленность светового луча.

Направленность светового луча определяется источником света. Например, для лазера основными являются три характеристики: когерентность, когда пики и спады волн располагаются параллельно и совпадают по фазе во времени и пространстве; монохромность, когда световые волны имеют одинаковую длину; коллимация, когда волны в луче света сохраняют параллельность, не расходятся, и луч переносит энергию практически без потерь. Другие источники света имеют более широкую диаграмму направленности.

Для каждого случая необходимо определить требуемое значение минимального загрязнения светом и максимально увеличить эффективность излучения за счет сфокусированности пучка на освещаемой площади. Направленность светового луча также можно улучшить с помощью линз и применения корпусов специальной формы.

В отличие от радиосигналов, направленность также позволяет определить источник света, а следовательно, и источник информации.

2. Форм-фактор.

Размер оборудования, используемого для ОССП ближнего действия, может составлять несколько сантиметров. Полупроводниковые лазеры и светодиоды, используемые для ОССП, имеют очень небольшую мощность (несколько милливатт), что делает ОССП подходящей для одноранговых сетей с ограниченной мощностью, сенсорных сетей и многоскачковых сетей для улучшения качества связи и снижения отношения пиковой мощности к средней (PAPR – Peak-to-average power ratio) [1].

3. Возможность эксплуатации без лицензии по всему миру.

Оптические длины волн не требуют лицензии, и для развертывания ОССП не требуется разрешения, если они безопасны для глаз. Системы ОССП могут быть развернуты в режиме ad-hoc (режим прямого соединения).

4. Критерии выбора длины волны.

Выбор длины волны передатчика оптического излучения будет зависеть от характеристик распространения в атмосфере, оптического фонового шума и технологий их изготовления. Для длинного атмосферного канала длина волны ограничена спектральными областями с очень низким атмосферным поглощением. Еще одним ограничением является флуктуация интенсивности (мерцание) из-за турбулентности, так как свет обладает также и волновыми свойствами. Сила флуктуаций интенсивности убывает как λ-7/6. Таким образом, мерцание и, следовательно, коэффициент битовых ошибок (BER – Bit Error Ratio) можно уменьшить, используя более длинные волны [2].

5. Проблемы и ограничения.

Чтобы обеспечить качество и надежность доступа к каналу передачи данных с помощью технологий ОССП, первостепенное значение имеет точная характеристика передачи данных для различных условий окружающей среды. Оптический луч испытывает серьезные проблемы в системах беспроводной оптической связи за счет наличия в канале гидрометеоров и эффектов дифракции и интерференции.

Структурная схема установки для оценки параметров атмосферного канала. Передатчик и приемник могут быть размещены на расстоянии друг от друга до 50 метров в помещении или в открытом пространстве с учетом изменения высоты как передатчика, так и приемника. Передатчик включает полупроводниковый светодиодный источник (СД), драйвер и блок питания, а также передающую оптическую систему (ПОС), для изменения диаграммы направленности луча света.

Приемник состоит из приемной оптической системы (ПрОС), узкополосного интерференционного оптического фильтра (УИОФ), регулируемого делителя луча (РДЛ), фотодиода (ФД), трансимпедансного усилителя (ТИУ) [3], оптоэлектронного детектора положения (ОДП), моноимпульсной арифметической схемы (МАС), измерителя мощности (ИМ), автоматизированной системы сбора данных (ССД). Оптоэлектронное оборудование собрано таким образом, чтобы измерять флуктуации мощности в мВт и смещение луча в вольтах.

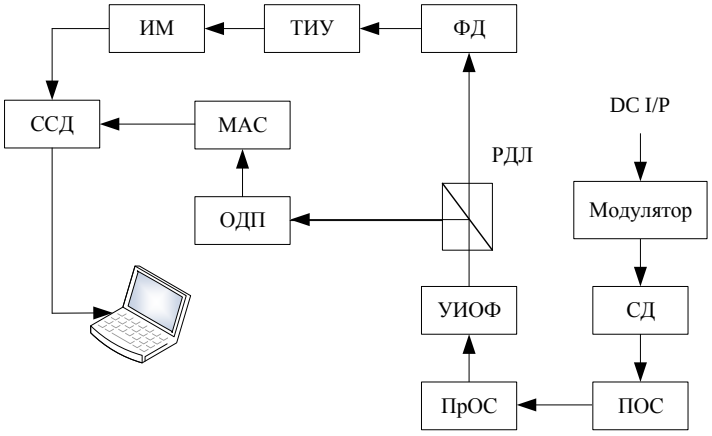


Рис. 1. Структурная схема установки для оценки параметров атмосферного канала

ПрОС улавливает все фотоны и концентрирует их в УИОФ, который предназначен для пропускания оптического луча с определенной длиной волны (центральная длина волны), а также для блокировки других длин волн. РДЛ делит падающий пучок (выход УИОФ) на два направления: отраженный и распространяющийся. Отраженный луч падает на ОДП для измерения информации о дрейфе луча с использованием вычислений МАС. Распространяющийся пучок падает на фотодиод, а его выход подключается к измерителю мощности. Все оптоэлектронные устройства должны быть смонтированы на местах с демпфированием вибрации.

Необходимые параметры извлекаются из значений измерений и применяются к моделям для прогнозирования затухания.

Оптическое излучение, проходящее через атмосферный турбулентный канал, взаимодействует с молекулярными составляющими атмосферы и теряет часть фотонов, что приводит к потере мощности, временным и пространственным искажениям, которые сильно зависят от погодных условий в случае установки системы вне помещения.

Атмосферное затухание является результатом комбинированного эффекта поглощения и рассеяния оптического поля взвешенной в среде мутностью, зависящей от атмосферных и земных условий [4]. Поведение молекул и аэрозолей в процессах рассеяния и поглощения зависит от длины волны. В оптической (или видимой) области спектра через атмосферу хорошо проходит свет с длинами волн между 300 и 900 нм. Этот диапазон включает ближний ультрафиолет и инфракрасное излучение, невидимое для человеческого глаза. Молекулярное рассеяние очень мало в ближнем инфракрасном диапазоне из-за зависимости от λ^{-4}, поэтому им можно пренебречь. Аэрозольное рассеяние становится доминирующим фактором.

Поведение модели атмосферного затухания должно быть экспериментально проверено для ее обобщения и точности предсказания при применении в реальной открытой атмосфере, для наиболее часто используемой длины волны в системах ОССП 850 нм.

Линия ОССП – оптоэлектронная сборка и описание настройки. Структурная схема установки линии ОССП [5] показана на рисунке 2 и состоит из оптического источника (ОИ), оптического смесителя (ОС), генератора помех (ГП), цифро-аналогового преобразователя (ЦАП), передающей оптической системы (ПОС), приемной оптической системы (ПОС), быстрого ориентируещего зеркала (БОЗ), регулируемого делителя луча (РДЛ), оптоэлектронного детектора положения (ОДП), аналого-цифрового преобразователя (АЦП), нейронного контроллера (НК). БОЗ содержит три пьезоэлектрических привода с зеркалом управления лучом.

Установку необходимо размещать на столе с гашением вибрации. Оптический пучок, исходящий от источника, попадает на оптический смеситель (ОС) и передается на приемник по атмосферному турбулентному оптическому каналу.

Передающая оптика используется для увеличения диаметра луча. Произвольные последовательности возмущений генерируются ПК1, и соответствующее аналоговое напряжение подается на оптический смеситель. Приемная оптическая система (ПрОС) улавливает всю оптическую мощность и отражает ее, чтобы она падала на БОЗ. Падающий луч света БОЗ попадает в РДЛ, который разделяет падающий луч на два луча: отраженный и прошедший.

Отраженный луч падает на фотодиод для генерации напряжения, связанного линейной функцией с отрицательным наклоном от интенсивности света. Поскольку наклон линейной зависимости отрицательный, при увеличении интенсивности света выходное напряжение фотодиода уменьшается. Таким образом, если на фотодиод не падает свет, выходное напряжение является положительным. И наоборот, если количество света, освещающего фотодиод, слишком велико, датчик насыщается и выходное напряжение равно нулю.

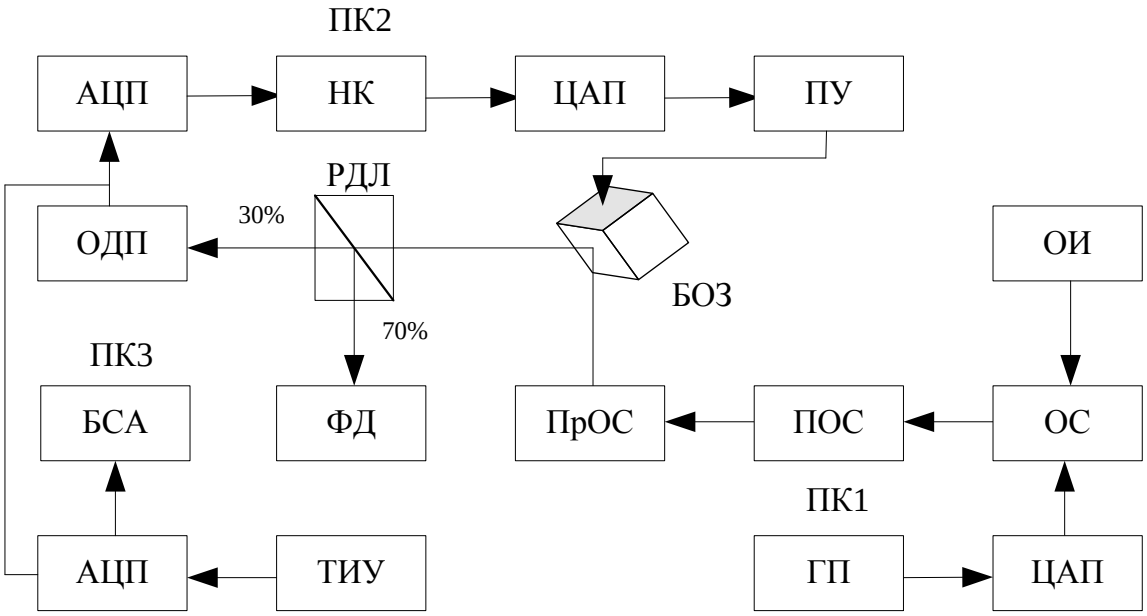


Рис. 2. Структурная схема установки линии ОССП

Передаваемый поток (прошедший через РДЛ) попадает на ОДП. Выходные сигналы ОДП поступают на АЦП, а данные об ошибках передаются в нейронный контроллер, разработанный в ПК2. Данные отклика НК преобразуются в аналоговый сигнал с помощью ЦАП и передаются в БОЗ через пьезоусилители. Выходы ОДП, работа контроллера и выходы фотодиодов постоянно контролируются с помощью блока статистического анализ (БСА) в ПК3. ОДП и пьезоэлектрические приводы являются ключевыми устройствами, которые обеспечивают эффективное быстрое и точное управление лучом в канале ОССП. ОДП состоит из четырех отдельных идентичных кремниевых фотодиодов, обозначенных буквами A, B, C и D и расположенных в квадрантной геометрии. Эти детекторы преобразуют падающий свет в относительные токи IA, IB, IC и ID, а затем токи преобразуются в относительные уровни напряжения VA, VB, VC и VD с помощью схемы преобразования ток-напряжение. Напряжение, генерируемое каждым квадрантом, пропорционально оптической энергии, освещающей его поверхность, как показано на рис. 3.

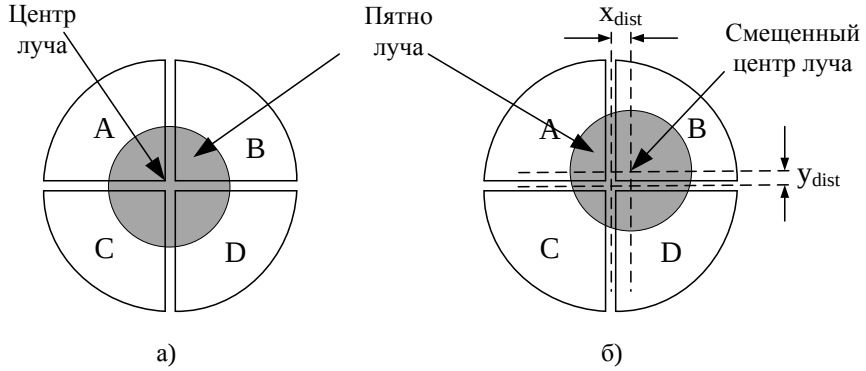


Рис. 3. Пятно луча на поверхности оптоэлектронного детектора:
а) центрированное на позиции (0, 0); б) смещенное на позицию (X_{dist}, Y_{dist})

Выходы ОДП подключены к моноимпульсной арифметической схеме (МИАС), в которой ошибки пространственного смещения пятна луча V_{Ex} и V_{Ey} вдоль каналов x и y (2D-плоскость) измеряются как относительные изменения выходного напряжения [6], [7].

$$V_{Ex} = \{(V_A + V_C) - (V_B + V_D)\},$$
$$V_{Ey} = \{(V_A + V_B) - (V_C + V_D)\}. \quad (1)$$

МИАС построена с использованием операционных усилителей для суммирования и вычитания сигналов, как указано в уравнении (1). Опорный сигнал $V_{\mathrm{Re}\,f}$ измеряется алгебраической суммой сигналов от всех квадрантов ОДП [6], [7], как в уравнении (2).

$$V_{\mathrm{Re}\,f} = (V_A + V_B + V_C + V_D) \quad (2)$$

Аналоговые выходные сигналы V_{Ex}, V_{Ey} и $V_{\mathrm{Re}\,f}$ изменяются от -10 В до +10 В и от 0 В до +10 В соответственно. Эти сигналы применяются к 16-битной системе сбора данных, которая состоит из восьми аналоговых входов, четырех аналоговых выходных каналов и коммуникационного порта RS232. Алгоритм нейронного контроллера реализован в режиме реального времени в ПК2. Важными статистическими величинами, связанными со смещением луча на ОДП, являются: расстояние по азимуту x_{dist} и углу места y_{dist} (мм); радиальное расстояние γ, которое представляет собой линию, соединяющую центр ОДП и центр притяжения луча (мм); угол отклонения луча на плоскости ОПД ϑ (мкрад). Указанные величины оцениваются уравнениями (3)–(5).

$$x_{dist} = -2\left(\frac{V_{Ex}}{V_{\mathrm{Re}\,f}}\right) \quad \text{и} \quad y_{dist} = -2\left(\frac{V_{Ey}}{V_{\mathrm{Re}\,f}}\right) \quad (3)$$

$$\gamma = \sqrt{x^2{}_{dist} + y^2{}_{dist}} \quad (4)$$

$$\vartheta = \begin{cases} 0 & если\, V_{Ex} = V_{Ey} = 0, и\, V_{Ex} < 0, V_{Ey} = 0, \\ 3.1415 & если\, V_{Ex} > 0, V_{Ey} = 0, \\ 1.5707 & если\, V_{Ex} = 0, V_{Ey} > 0, \\ 4.7123 & если\, V_{Ex} = 0, V_{Ey} < 0, \\ -\arctan\dfrac{y_{dist}}{x_{dist}} & если\, V_{Ex} < 0, V_{Ey} > 0, \\ \arctan\dfrac{y_{dist}}{x_{dist}} + 1.5707 & если\, V_{Ex} > 0, V_{Ey} > 0, \\ \arctan\dfrac{y_{dist}}{x_{dist}} + 3.1415 & если\, V_{Ex} > 0, V_{Ey} < 0, \\ \arctan\dfrac{y_{dist}}{x_{dist}} + 4.7123 & если\, V_{Ex} < 0, V_{Ey} < 0 \end{cases} \quad (5)$$

Разработка модели нейронной сети. Один из наиболее распространенных подходов для достижения лучших результатов от контроллера – это нормализация данных. Нормализация данных также может ускорить обработку каждой характеристики в одной и той же шкале и особенно важна для задач аппроксимации функций, моделирования и управления. Экспериментальные входные значения масштабируются так, чтобы они находились в диапазоне от -1 до +1. Масштабирование (нормализация) выполняется с использованием линейной интерполяции, как указано в уравнении (6). Эта нормализация имеет преимущество в том, что она точно сохраняет все отношения, которые не вводят какое-либо смещение.

$$\sigma_{E_x} = \frac{2048 - ((V_{E_x} + 10)/0,00489)}{((V_{\mathrm{Re}\,f} + 10)/0,00489) - 2048}$$
$$\sigma_{E_y} = \frac{((V_{E_y} + 10)/0,00489) - 2048}{((V_{\mathrm{Re}\,f} + 10)/0,00489) - 2048} \quad (6)$$

где σ_{E_x} и σ_{E_y} – это нормализованные значения ошибки для смещения позиции по x и y соответственно.

Ошибка и соответствующие управляющие переменные измеряются экспериментально. Для экспериментов должен использоваться подходящий ортогональный набор, у которого степени свободы больше или, по крайней мере, равны степеням свободы переменных процесса. Например можно использовать ортогональный набор L_{81} (9^2).

Комбинации переменных ошибок и соответствующих управляющих переменных являются входными данными для метода проектирования и разработки с использованием методов моделирования Тагучи [5]. Разработанные уравнения (7) выглядят следующим образом:

1. Линейная модель

$$C_x = b_0 + b_1\sigma_{E_x} + b_2\sigma_{E_y}$$
$$C_y = b_3 + b_4\sigma_{E_x} + b_5\sigma_{E_y}$$

2. Квадратичная модель

$$C_x = b_0 + b_1\sigma_{E_x} + b_2\sigma_{E_y} + b_3\sigma^2{}_{E_x} + b_4{}^2\sigma_{E_y}$$
$$C_y = b_5 + b_6\sigma_{E_x} + b_7\sigma_{E_y} + b_8\sigma^2{}_{E_x} + b_9{}^2\sigma_{E_y}$$

3. Модель взаимодействия (7)

$$C_x = b_0 + b_1\sigma_{E_x} + b_2\sigma_{E_y} + b_3\sigma_{E_x E_y}$$
$$C_y = b_4 + b_5\sigma_{E_x} + b_6\sigma_{E_y} + b_7\sigma_{E_x E_y}$$

4. Полная модель

$$C_x = b_0 + b_1\sigma_{E_x} + b_2\sigma_{E_y} + b_3\sigma^2{}_{E_x} + b_4\sigma^2{}_{E_y} + b_5\sigma_{E_x}\sigma_{E_y}$$
$$C_y = b_6 + b_7\sigma_{E_x} + b_8\sigma_{E_y} + b_9\sigma^2{}_{E_x} + b_{10}\sigma^2{}_{E_y} + b_{11}\sigma_{E_x}\sigma_{E_y}$$

Для обработки данных об отклонении луча оптической системы связи предлагается использовать нейронную сеть с архитектурой, которая способна анализировать и классифицировать такие отклонения. Разработка модели нейронной сети предполагает прохождение этапов сбора и подготовки данных, выбора архитектуры нейронной сети (например, сверточные нейронные сети) [8], создания архитектуры сети с определением количества и типов слоев, обучение модели, оценки и тестирования, настройки и оптимизации, развертывания, мониторинга.

Нормализованные значения переменных ошибок применяются к входному слою (ВхС). Узлы входного слоя подключены через взвешенную сеть к массиву скрытого слоя 1 (СС1). Веса «w_{ji}^1» представляют собой коэффициенты линейной передачи и смещения «b_j^1», определенные в процессе обучения, и они составляют СС1 предлагаемого нейронного контроллера.

Точно так же веса «w_{kj}^2» и смещения «b_k^2» составляют СС2. Выходы СС2 проходят через другой набор весовых функций «w_{ik}^3» со смещением «b_i^3» к выходному слою (ВыхС). Количество скрытых слоев и нейронов определяется методом проб и ошибок, чтобы приспособить конвергентную ошибку к цели.

2–12–9–2 (2 нейрона в ВхС, 12 нейронов в СС1, 9 нейронов в СС2 и 2 нейрона в ВыхС) представляет собой структуру предлагаемого нейроконтроллера, как показано на рисунке 4.

Среднеквадратическая ошибка (MSE), как указано в уравнении (8), используется для измерения показателя производительности нейронного контроллера на этапе обучения [9], [10].

$$MSE = \frac{1}{2}\sum_{j=1}^{N}\left(T_{pj} - O_{pj}\right)^2 \quad (8)$$

где T_{pj} – целевое (желаемое) значение от j-го нейрона; O_{pj} – фактическое выходное значение j-го нейрона; N – количество выходных нейронов.

При обратном распространении алгоритм градиентного спуска, в котором веса и смещения нейронной сети перемещаются по отрицательному градиенту функции производительности позволяют минимизировать ошибку между предсказанными значениями нейронной сети и фактическими данными. [11]. Алгоритм основан на простой идее непрерывного изменения силы входных соединений, чтобы уменьшить разницу между желаемым и фактическим выходом нейронной сети [9]. Синаптические веса изменяются таким образом, чтобы минимизировать MSE нейронной сети [12]. Это правило также называют правилом обучения наименьшего среднего квадрата (LMS) [9].

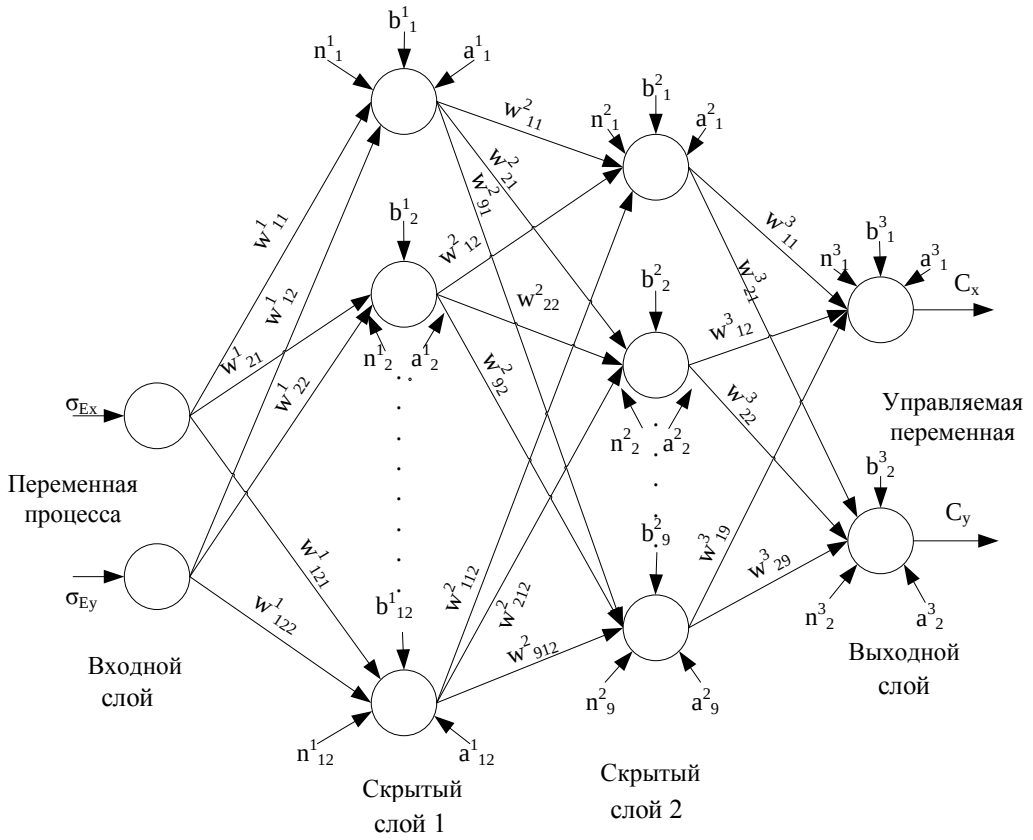


Рис. 4. Предлагаемая структура нейроконтроллера с многослойной моделью персептрона 2–12–9–2

Алгоритм обучения с обратным распространением для структуры нейронной сети, показанной на рисунке 4, состоит из следующих шагов:

1. Создание нейронов и производных функций f(x) и f’(x).
2. Назначение значения для скорости обучения, импульса, цели и т. д.
3. Назначение меньшего случайного значения для весов и смещений:

$$w^1_{11}...w^1_{121},\ w^1_{12}...w^1_{122},$$
$$w^2_{11}...w^2_{112}, w^2_{21}...w^2_{112},\ w^2_{31}...w^2_{312},$$
$$w^2_{41}...w^2_{412}, w^2_{51}...w^2_{512}, w^2_{61}...w^2_{612},$$
$$w^2_{71}...w^2_{712}, w^2_{81}...w^2_{812}, w^2_{91}...w^2_{912},$$
$$w^3_{11}...w^3_{19},\ w^3_{21}...w^3_{29},$$
$$b^1_1...b^1_{12},\quad b^2_1...b^2_9,\ b^1_3,\ b^3_2.$$

4. Если con = 1, передача обучающих данных для вычисления n_j^1:

$$n_j^1 = \sum_{ji} w_{ji}^1 x_i + b_j^1, \qquad j \to 1\ to\ 12,\ i \to 1\ to\ 2.$$

5. Применение n_j^1 к функции активации CC1: $a_j^1 = f(n_j^1)$.

6. Передача a_j^1 для вычисления n_k^2: $n_k^2 = \sum_{kj} a_j^1 w_{kj}^2 + b_k^2$, $k \to 1\ to\ 9$.

7. Применение n_k^2 к функции активации CC2: $a_k^2 = f(n_k^2)$.

8. Передача a_k^2 для вычисления n_1^3: $n_1^3 = \sum_{ik} a_k^2 w_{ik}^3 + b_i^3$.

9. Применение n_1^3 к функции активации ВУ, чтобы получить a_1^3: $a_1^3 = f(n_1^3)$ и $a_2^3 = f(n_2^3)$.

10. Сравнение a_1^3 и a_2^3 с целью вычисления ошибки: $\Delta_i^3 = (t_i - a_i^3) f'(n_i^3)$.

11. Обратное распространение Δ_i^3 на CC2 и вычисление δ_k^2 как: $\delta_k^2 = \sum_{ki} \Delta_i^3 w_{ik}^3$.

12. Вычисление информации об ошибке на CC2: $\Delta_k^2 = \delta_k^2 f'(n_k^2)$.

13. Обратное распространение Δ_k^2 на CC1 и вычисление δ_j^1 как: $\delta_j^1 = \sum_{jk} \Delta_k^2 w_{jk}^2$.

14. Вычисление информации об ошибке на CC1: $\Delta_j^1 = \delta_j^1 f'(n_j^1)$.

15. Вычисление условия коррекции веса и смещения: $\Delta w_{ji}^1 = \alpha \Delta_j^1 x_i$, $\Delta w_{kj}^2 = \alpha \Delta_k^2 a_j^1$, $\Delta w_{ik}^3 = \alpha \Delta_1^3 a_k^2$, $\Delta b_j^1 = \alpha \Delta_j^1$, $\Delta b_k^2 = \alpha \Delta_k^2$, $\Delta b_{il}^3 = \alpha \Delta_j^1$.

16. Обновление веса и смещения:

$$\begin{gathered} w_{ji}^1(n+1) = w_{ji}^1 + \Delta w_{ji}^1,\ w_{kj}^2 = w_{ji}^2(n+1) = w_{ji}^2 + \Delta w_{ji}^2, \\ w_{ik}^3 = w_{ji}^3(n+1) = w_{ji}^3 + \Delta w_{ji}^3, \\ b_j^1(n+1) = b_j^1(n) + \Delta b_j^1,\ b_j^2(n+1) = b_j^2(n) + \Delta b_j^2, \\ b_j^3(n+1) = b_j^3(n) + \Delta b_j^3. \end{gathered} \tag{9}$$

17. Конечный фрагмент кода выглядит следующим образом:

```
if error <= goal, con = 0; disp( ); plot( ); break;
else epoch = epoch + 1; repeat training;
end,
end.
```

Функции активации сохраняются как идентичные, следовательно, единственными параметрами для отображения «T_{pj}» на «O_{pj}» являются веса и смещения (9). Три матрицы весов и три матрицы смещения могут быть скорректированы таким образом, чтобы значение вектора ошибки было минимальным. Многоуровневые нейронные сети выглядят как универсальные системы нелинейного отображения с весами и смещениями, выступающими в качестве параметров.

Исследования показали, что при скорости обучения 0,57 с и моментуме 0,9 сеть обучается на 1364 итерации. В конце процесса обучения значение MSE меньше 0,0000009427.

Цель 0,000001 является критерием остановки для этой сети. Предлагаемый нейроконтроллер требуется обучить и протестировать в среде моделирования для нескольких

шаблонов данных. Один из обученных шаблонов структуры сети нейроконтроллера показан на рис. 5.

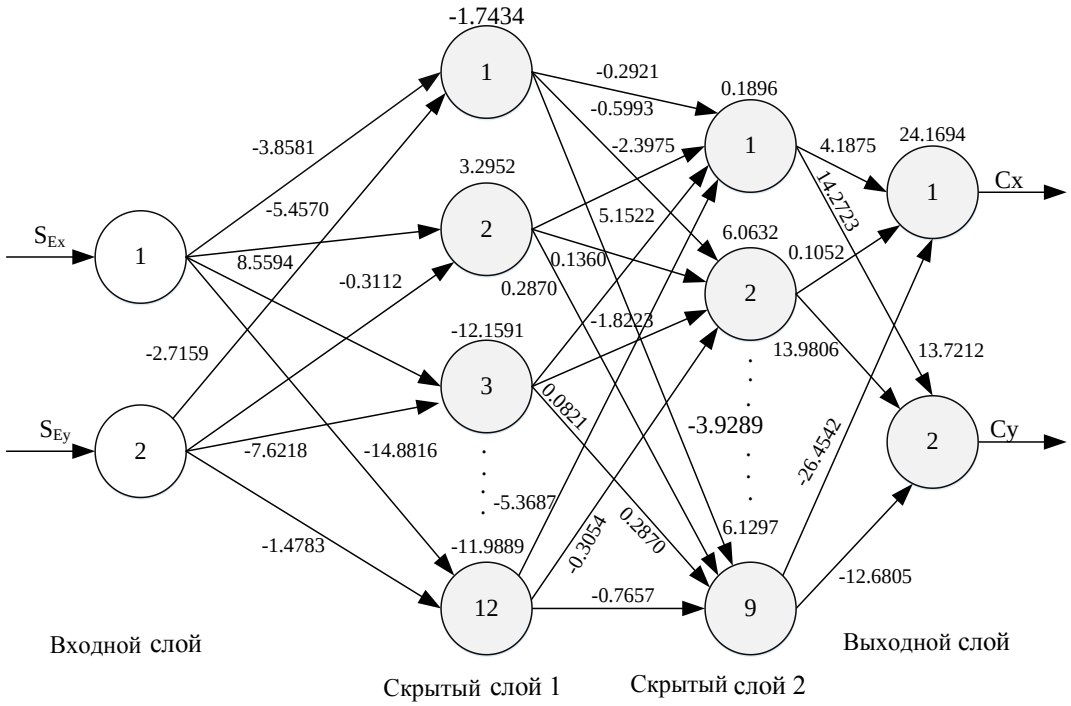


Рис. 5. Шаблон структуры нейронной сети с закодированными весами и значениями смещения, полученными из алгоритма обучения обратного распространения

Формулировка и реализация прямого контроллера. Экспериментальные входные значения масштабируются, чтобы лежать в диапазоне от -1 до +1. Масштабирование (нормализация) выполняется по формуле линейной интерполяции, полученной, как указано в уравнении (6). Отношения входа и отклика измеряются экспериментально с использованием экспериментальной установки, показанной на рисунке 2. Для выполнения нормализации и арифметических операций используется стандарт одинарной точности с плавающей запятой [13], [14].

Для обучения на кристалле аппаратные платформы имеют ряд недостатков, таких как достижение высокой точности данных, высокая стоимость оборудования для вычислений, время разработки и гибкость платформы по сравнению с программным обеспечением [15], [16], [17], [18]. Поскольку при проектировании нейроконтроллеров требуется больше вычислений и сложных арифметических вычислений, в настоящее время большинство нейроконтроллеров моделируются программным обеспечением и реализуются в программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС). Таким образом, веса и смещения нейроконтроллера получаются из среды моделирования, расположенной на ПК в качестве отправной точки для аппаратной реализации. Количество скрытых слоев и нейронов определяется методом проб и ошибок, чтобы приспособить конвергентную ошибку к цели. 2–12–9–2 (2 нейрона во входном слое (ВхС), 12 нейронов в 1-м скрытом слое (СС1), 9 нейронов во 2-м скрытом слое (СС2) и 2 нейрона в выходном слое (ВыхС)) – структура разрабатываемого нейроконтроллера.

Глобальная блок-схема нейроконтроллера, разработанного на основе цифрового вычислителя поворота системы координат (англ. CORDIC – COordinate Rotation DIgital Computer), показана на рисунке 6 и состоит из различных основных процессоров данных и механизма управления. Все блоки/модули разработаны для параллельной работы с управляемыми данными и командами. Управляющая информация механизма исходного конечного автомата предоставляет команды, которые координируют и выполняют различные операции в секции процессора данных для выполнения желаемой задачи обработки данных.

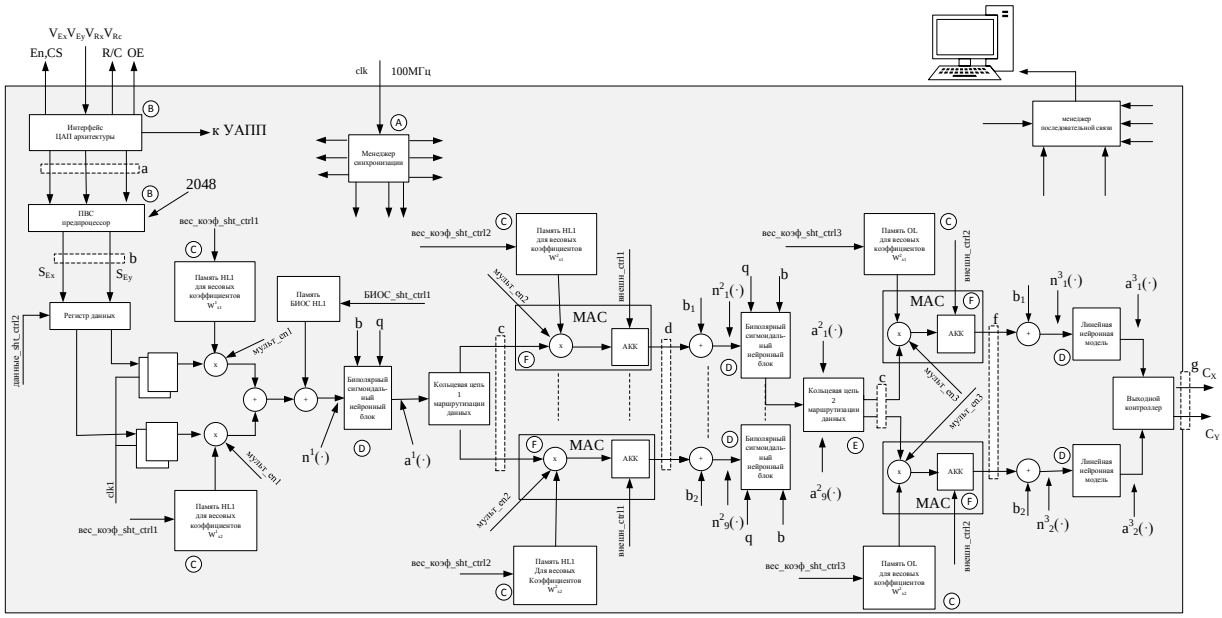


Рис. 6. Архитектура блока нейроконтроллера

Цифровые схемы выступают в роли контроллера, который обеспечивает временную последовательность сигналов для инициирования операций в тракте данных, а также определяет следующее состояние подсистемы управления. Для вычислительных операций алгоритмов требуется конвейерная архитектура [19]. Этапы конвейера отмечены (строчными буквами) на рис. 6.

Разработанная архитектура разделена на семь основных блоков (обозначенных заглавными буквами на рисунке 6), а именно (A) блок синхронизации, (B) блок оцифровки сигналов и обработки данных, (C) схема управления памятью веса и смещения, (D) нейронный блок, (E) маршрутизация данных и кольцевая цепь, (F) блок многократного накопления и (G) менеджер последовательной связи.

Заключение. Рассмотрены возможность применения нейронных сетей в системах передачи данных видимым светом, характеристики оптической связи в свободном пространстве. Приведены структурные схемы линий оптической связи в свободном пространстве. Предложено использовать нейроконтроллер с многослойной моделью персептрона на основе ПЛИС.

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.

APPLICATION OF NEURAL NETWORKS TO OPTIMIZE DATA TRANSMISSION PARAMETERS IN WIRELESS OPTICAL COMMUNICATION CHANNELS

S. PALAVENIA, A. PYTSEL

Abstract

The possibility of using neural networks in visible light data transmission systems, the characteristics of optical communication in free space, structural diagrams of optical communication lines in free space, as well as the proposed structure of a neurocontroller with

a multilayer perceptron model are considered, and the architecture of the neurocontroller unit is proposed.

Список литературы

1. Majumdar, A. K. Free-Space Laser Communications: Principles and Advances / A. K. Majumdar, C. J. Ricklin, // Optical and Fiber Communications Reports. – Springer. – USA, 2008.

2. Hemmati, H. Near-Earth Laser Communication / H. Hemmati // CRC Press. – New York, 2009. – P. 59–96.

3. Keim, R. Negative Feedback, Part 8: Analyzing Transimpedance Amplifier Stability / R. Keim // All about circuits Journal. – 2015.

4. Bazil, Raj A. Terrestrial Free Space Line of Sight Optical Communication (TFSLSOC) using Adaptive Control Steering System with Laser Beam Aligning, Tracking and Positioning (ATP) / A. Bazil Raj [et al.] // IEEE Int., Conf. Wireless Communication & Sensor Computing . – Chennai, 2011. – P. 1–5.

5. Bazil, Raj A. Lower-Order Adaptive Beam Steering System in Terrestrial Free Space Point-to-Point Laser Communication using Fine Tracking Sensor / A. Bazil Raj // IEEE Int. Conf., Signal Processing, Communication, Computing and Networking Technologies. – Thuckalay, 2011. – P. 699–704.

6. Fidler, F. Optical Communications for High-Altitude Platforms / F. Fidler [et al.] // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. – 2010 – Vol. 16. – № 5. – P. 1058–1070.

7. Yang, T. Adaptive Alignment Packaging for 2-D Arrays of Free – Space Optical – Interconnected Optoelectronic Systems / Tsung-Yi Yang, James & Walker Gourlay, C. Andrew // IEEE Transactions on Advanced Packaging. – 2002. – Vol. 25. – № 1. – P. 54–63.

8. Asokan, P. Development of multi-objective optimization models for electrochemical maching process / P. Asokan, R. Ravikumar, R & Santhi Jeyapaul // International Journal on Advanced Manufacturing Technology. – 2008. – Vol. 39. – № 1–2. – P. 55–63.

9. Key, J. Искусственные нейронные сети управления технологическими процессами / J. Key // Control Engineerin. – 2016. – Vol. 3 (63). – P. 62–66.

10. Sprangle, P. Incoherent combining and atmospheric propagation of high-power fiber lasers for directed-energy applications // P. Sprangle [et. al.] // IEEE journal of Quantum Electronics. – Bahman, 2009. – Vol. 45. – № 2. – P. 138–148.

11. Белошедов, Е. С. Алгоритмы стохастического градиентного спуска обучения и тренировки нейронных сетей / Е. С. Белошедов [и др.] // Информационные технологии и системы 2020 (ИТС 2020): материалы международной научной конференции, Минск, 18 ноября 2020 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники; редкол. : Л. Ю. Шилин [и др.]. – Минск, 2020. – С. 151–152.

12. Ahmed, Y. A. Automatic ship berthing using artificial neural network trained by consistent teaching data using nonlinear programming method / Y. A. Ahmed, H. Kazuhika // Engineering applications of artificial intelligence. – 2013. – Vol. 26. – № 10. – P. 2287–2304.

13. Benrekia, F. A Floating Point Multiplier based FPGA Synthesis for Neural Networks Enhancement / F. A. Benrekia // International Journal of Engineering Science and Technology. – 2010. – Vol. 2. – № 5. – P. 1433–1440.

14. Monmasson, E. FPGA Design Methodology for Industrial Control Systems – A review / E. Monmasson, M. Cirstea // IEEE Transactions of Industrial Electronics. – 2007. – Vol. 54. – № 4. – P. 1824–1842.

15. Лебедев, М. С. Реализация искусственных нейронных сетей на ПЛИС с помощью открытых инструментов. / М. С. Лебедев, П. Н. Белецкий // Труды ИСП РАН, 2021. – Т. 33. – Вып. 6. – С. 175–192.

16. Попова, Ю. Б. Программная реализация иискусственной нейронной сети для управления виртуальными объектами / Ю. Б. Попова, С. В. Яцынович // Информационные технологии в образовании / Белорусский национальный технический университет. – Минск, апрель 2017. – С. 72–78.

17. Gomperts, A. Development and Implementation of Parameterized FPGA-Based General Purpose Neural Networks for Online Applications / A. Gomperts, A. Ukil, F. Zurfluh // IEEE Transactions on Industrial Informatics. – 2011. – Vol. 7, № 1. – P. 78–89.

18. Skoda, P. Implementation Framework for Artificial Neural Networks on FPGA / P. Skoda [et al.] // Proceedings of 34th International Convention MIPRO. – Opatija, 2011. – P. 274–278.

19. Farmahini-Farahani, A. Parallel scalable hardware implementation of asynchronous discrete particle swarm optimization / A. Farmahini-Farahani [et al.] // Engineering Applications of Artificial Intelligence. – 2010. – Vol. 23, №. 2. – P. 177–187.

УДК 378

СИНТЕЗ ПОЛИАГЕНТНЫХ КОМПОНЕНТОВ ИНФОРМАЦИОННОГО ПОИСКА РЕСУРСОВ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОННОГО ОБРАЗОВАНИЯ

С.Л. ЯБЛОЧНИКОВ[1], И.О. ЯБЛОЧНИКОВА[2], К.Ф. ШАКИРОВ[3]

[1]*Московский технический университет связи и информатики,*
ул. Авиамоторная, 8А, Москва, 111024, Россия
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3565-2052

[2]*Московский технический университет связи и информатики,*
ул. Авиамоторная, 8А, Москва, 111024, Россия
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6685-9729

[3]*Московский технический университет связи и информатики,*
ул. Авиамоторная, 8А, Москва, 111024, Россия
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8736-4605

Поступила в редакцию 22 ноября 2023

Представлены результаты относительно синтеза базы данных системы поддержки процессов реализации электронного обучения, а также алгоритмов формирования совокупности образовательного контента, обеспечивающего для пользователей следование вдоль индивидуального трека. Уделено внимание таким аспектам интеллектуального поиска образовательного контента, как идентификация объектов по метаданным, оценка релевантности контента образовательным целям пользователей системы и индексирование результатов поиска. Авторы реализовали попытку определить некоторое конечное множество возможных ситуаций относительно функционирования интеллектуальной подсистемы поиска контента.

Ключевые слова: ИКТ, базы данных, базы знаний, образовательный контент, система поддержки процессов электронного обучения.

Введение. Различные средства ИКТ, базы знаний и базы данных, облачные технологии и многочисленные сервисы в современных условиях являются основой для успешной реализации образовательной деятельности в целом и подготовки бакалавров и магистров в области связи и телекоммуникаций, в частности. Такая деятельность ныне фактически осуществляется в смешанной форме, и, так называемое, электронное обучение – всего лишь эффективный инструмент, с помощью которого вполне возможно решить ряд проблем, возникающих при этом. Системный анализ совокупности аспектов его организации, алгоритмов формирования образовательного контента, особенностей применения облачных сервисов, исходя из глобальных и локальных целей осуществления обучения в такой форме, – являются весьма актуальными задачами.

Обусловленные специфическими условиями жизнедеятельности во время пандемии COVID-2019 изменения технологий взаимодействия участников совокупности педагогических процессов и принципов формировании их взаимоотношений оказались настолько глобальными, что, по сути дела, в последствии во многих странах концепция образовательной деятельности в целом на всех уровнях иерархии была коренным образом пересмотрена. Более того, указанные выше организационные, технические и программные инновации нашли соответственное отражение в правовом поле, а также активно способствовали возникновению и развитию совокупности идей относительно существенного повышения эффективности

применения средств информационно-коммуникационных технологий, баз данных, облачных сервисов в осуществлении обучения в режиме on-line.

Благодаря упомянутым нами выше инновационным идеям специалистов в области ИКТ, сегодня стремительно развиваются различные образовательные онлайн-платформы, которые, в конечном итоге, позволили реально реализовать на практике ранее заявленный и продвигаемый педагогическим сообществом принцип обучения на протяжении всей активной жизни человека. Представители многих социальных слоев населения, получив, фактически, неограниченный доступ к ресурсам глобальной сети Интернет, ныне обладают существенно большими чем ранее возможностями для улучшения своего профессионального и интеллектуального развития, а также непрерывного повышения квалификации и реализации переподготовки. Однако, несмотря на указанные выше обстоятельства, определяющие весьма большие перспективы для предоставления широкого спектра образовательных услуг, существует множество проблем при осуществлении деятельности, как различных образовательных учреждений в целом, так и образовательных онлайн-платформ в частности. А, как показывает анализ научно-педагогической литературы и соответствующих Интернет-ресурсов, популярность образовательных платформ во всем мире растет день ото дня.

В том числе, данные проблемы обусловлены рядом нюансов, во многом определяющих успешность осуществления на практике совокупности образовательных действий и эффективность моделирования, а также дальнейшего прогнозирования формирования результатов образовательных процессов, реализуемых, например, с применением аппаратно-программных средств информационно-коммуникационных технологий. По мнению авторов, в первую очередь, указанные выше особенности и проблемы проявляются в случае, если учебный план сформирован таким образом, чтобы в некоторой образовательной программе могли бы принимать участие обучающиеся с различными начальными уровнями сформированности профессиональных компетенций и интеллектуального развития. При этом конечный результат, достигаемый в результате осуществления образовательной деятельности, ориентированной на активное применение средств ИКТ и облачных сервисов, должен быть весьма предсказуемым. А всю образовательную деятельность, по сути дела, такого электронного обучения необходимо обосновывать, планировать и осуществлять исходя из концепции проектирования и создания интегрированной электронной образовательной среды, адаптируемой исходя из реальных условий ее функционирования.

Основная часть. Основа любой образовательной системы – это качественный образовательный контент. Поэтому, с учетом указанных выше предположений и предварительного анализа ряда аспектов проектирования совокупности аппаратно-программных средств эффективного осуществления электронного обучения, целью данной статьи является создание и обоснование алгоритмов эффективного формирования образовательного контента, а также моделирование некоторых аспектов образовательных процессов, реализуемых с применением интегрированной иерархической образовательной среды. Функционирование компонентов такой электронной образовательной среды (ЭОС) должно быть адаптировано в зависимости от реальных интеллектуальных способностей множества участников образовательного процесса и действительного уровня сформированности их профессиональных компетенций (знаний, умений и навыков). Или же хотя бы оно должно учитывать уровень некоторой информированности пользователей такой системы о сущности процессов, реализуемых в определенной предметной области.

По мнению авторов, в последнем случае, такой уровень информированности пользователей во многом определяется интегральной совокупностью информации (специальным образом сформированного индивидуального пакета образовательного контента), которая может быть представлена в электронной образовательной среде университета пользователям для успешного освоения ими за некоторый временной период учебного материала, коррелирующего с определенной тематикой в рамках реализуемой в форме электронного обучения образовательной программы. При этом, для обеспечения, по сути дела, эффективного индивидуально-ориентированного обучения такой пакет образовательного контента должен быть сформирован персонально для каждого представителя совокупности обучающихся. Структура и, в первую очередь, содержание этого контента также должны определяться текущим

уровнем профессиональных компетенций участников процесса обучения, которые непрерывно формируются на протяжении периода времени освоения такой программы.

Далее по тексту статьи мы уделим некоторое внимание существующим ныне моделям и соответствующим алгоритмам функционирования аппаратно-программных средств, а также формированию персонально-ориентированного образовательного контента систем электронного обучения. В частности, весьма важным компонентом, обеспечивающим эффективное функционирование таких систем, являются специализированные программные продукты. Такие программные комплексы, фактически, должны обеспечить осуществление совместного сценария реализации успешных и эффективных скоординированных действий по использованию интегральной электронной образовательной среды совокупностью авторизованных пользователей. Кроме того, необходимо удовлетворить множество требований широкого круга заказчиков образовательных услуг (а это совсем не просто), а также различных категорий пользователей системы электронного обучения. Следовательно, по мнению авторов данной статьи, такие программные комплексы должны обладать специфической адаптивной архитектурой [2].

При этом, в научной и научно-технической литературе приведена исчерпывающая информация относительно существования ряда весьма тривиальных организационных и технических решений, обеспечивающих наличие указанных выше свойств адаптивности архитектуры систем электронного обучения, в частности, путем осуществления синтеза так называемой компонентно-ориентированной архитектуры, предложенной, разработанной и обоснованной, в свое время отечественными и зарубежными авторами в ряде соответствующих публикаций [2–4].

И, как свидетельствует реализованный авторами анализ указанной выше информации, особенностями, которые присущи указанному выше персонально-ориентированному (или индивидуально-ориентированному) подходу относительно синтеза совокупности такого рода специфических программных продуктов, в том числе тех, которые применяются для осуществления и поддержки многомерной иерархии процессов электронного обучения, в частности являются:

– достаточно гибкая модульная структура совокупности программных средств, применяемых для практической реализации электронного обучения, и эффективное разграничение уровней доступа авторизованных пользователей к информации, которая хранится в соответствующих образовательных базах данных или же предоставляется различными облачными сервисами;

– наличие у указанных выше компонентов системы свойств, определяющих способность к так называемой самоидентификации и успешной идентификации иных компонентов, а также адекватному и эффективному представлению различным категориям авторизованных пользователей совокупности актуальной информации, в том числе, посредством формирования соответствующих метаданных;

– адекватная и оперативная реакция таких программных средств на динамические изменения параметров, характеризующих некоторую ситуацию, например, на изменения состояния определенного компонента системы, обусловленные, в частности, динамикой факторов внешней среды или же изменением образовательных целей. Такого рода реакция может выражаться, например, в осуществлении некоторой корректировки (по требованию множества заказчиков или по запросу определенной группы пользователей) соответствующих свойств (в том числе ключевых) программного продукта в целом;

– успешное адаптивное и автоматизированное управление всеми имеющимися в наличии ресурсами системы и осуществление процедур эффективного динамического контроля относительно большой совокупности реальных и возможных (вероятных) событий, с последующим оперативным формированием адекватной реакции системы на определенные специфические последовательности таких событий;

– эффективное обеспечение наличия свойства динамической устойчивости компонентов системы электронного обучения, то есть их способности сохранять или же успешно восстанавливать свое состояние, например, при осуществлении перехода из одной среды в другую в процессе реализации жизненного цикла;

– многократное применение как самих программных средств для решения совокупности конгруэнтных задач, так и соответствующей базы данных (знаний), обеспечивающей удовлетворение запросов авторизованных пользователей системы на получение качественных образовательных услуг в полном объеме.

Если обобщить все перечисленные выше особенности синтезируемой системы электронного обучения, то можно отметить тот факт, что все они нацелены на обеспечение успешной реализации некоторой индивидуальной образовательной траектории ее пользователя (группы пользователей). Эта цель достигается за счет своеобразной адаптации (структурной и параметрической оптимизации) как всего комплекса программных средств, так и его отдельных компонентов. Немаловажную роль в достижении такого рода цели может сыграть применение совокупности современных инструментов интеллектуализации осуществления адаптивного управления системой электронного обучения.

В некотором обобщенном виде авторы предлагают следующим образом сформулировать совокупность функций, реализуемых эффективной электронной обучающей системой: эффективный интеллектуальный поиск совокупности актуального образовательного контента, как во внутренней, так и во внешней информационной среде; интегрирование и системный анализ контента, а также его структурирование и обеспечение долговременного хранения; предоставление доступа совокупности авторизованных пользователей к сформированной иерархической совокупности образовательного контента на основе некоторого интеллектуального алгоритма; формирование адаптивной образовательной траектории, исходя из индивидуальных особенностей и потребностей пользователей (группы пользователей); контроль качества функционирования всей системы и управляемого «движения» совокупности ее пользователей вдоль индивидуальной образовательной траектории; оперативная корректировка алгоритмов функционирования и, при необходимости, образовательных траекторий, на основании анализа результатов контроля; успешное формирование и поддержка комфортного (или как сегодня принято утверждать в специальной литературе, дружественного) интерфейса пользователя и прочее.

Интеллектуальный поиск совокупности интегрированного образовательного контента, с последующим его анализом и практическим применением для формирования индивидуальной образовательной траектории, во много предопределяет эффективность функционирования всей современной системы осуществления электронного обучения. Проблема достижения необходимого уровня эффективности, во многих случаях решается путем применения при конструировании и проектировании обучающей системы специфических встроенных интеллектуальных информационных программных модулей, именуемых в научно-технической литературе определенными исследователями – агентами [2–4]. А процесс поиска необходимого образовательного контента осуществляют в соответствии со следующим алгоритмом: поиск контента в интегрированном локальном информационном пространстве → релевантный поиск контента во внешней среде → структурирование и взаимная увязка, обнаруженного на двух предыдущих этапах реализации данного алгоритма, так называемого, «внутреннего» и «внешнего» контента → интеллектуальный мониторинг динамики запросов совокупности авторизованных пользователей → корректировка базового для электронного учебного курса контента.

Если первая из указанных нами выше задач достаточно успешно может быть решена с помощью вполне стандартных средств, то для решения второй, третьей и четвертой задач необходимо проведение предварительного анализа информации, а также практическое применение совокупности специфических инструментов и некоторых нетривиальных методов. Как правило, функционирование такого рода специфических компонентов системы электронного обучения ориентировано на использование принципов, алгоритмов и средств реализации мультиагентного подхода, рассмотренного исследователями в ряде публикаций [4–6]. В данном случае, по мнению авторов, этот термин не совсем отображает сущность реализуемых компонентами такого рода действий. Поэтому далее мы будем именовать подход полиагентным, акцентируя таким образом внимание на разнообразии функций, реализуемых ими.

В самом простом случае искомый контент (документ или же мультимедиа) представляется в виде совокупности определенным образом ассоциированных с ним внешних

атрибутов. Фактически стандартными и широко используемыми на практике при проектировании систем электронного обучения в этом смысле являются следующие «классические» модели, а именно: дескрипторного поиска; модель, использующая так называемое «дублинское ядро» [6, 7]. В первом случае атрибуты искомого электронного документа представляются в виде совокупности слов или словосочетаний (дескрипторов), присущих некоторой специфической предметной области. Эти дескрипторы должны более или менее адекватно отображать его содержание. А индексирование контента в системе в целом осуществляется путем идентификации совокупности указанных выше дескрипторов, реализуемой либо автоматически, либо непосредственно группой экспертов в некоторой предметной области еще на этапе проектирования и отладки программного средства. При этом фактически синтезируется определенный образ образовательного контента, который и хранится в базе данных [6–8]. Непосредственно сохранять абсолютно весь контент в системе нет необходимости.

Если же используется модель, именуемая в научной литературе как «дублинское ядро», то, по сути дела, реализуется анализ совокупности элементов метаданных, содержание которых зафиксировано в некоторой спецификации стандарта и, в соответствии с которыми, можно определенным образом идентифицировать сущность различных текстовых документов [7]. Впервые идея относительно формирования такого специфического ядра, в дальнейшем получившего наименование «дублинского», была предложена в 1995 году на одном из научных симпозиумов. Организаторами этого научного форума были Online Computer Library Center (OCLC) и National Center for Supercomuting Applications (NCSA). А сам симпозиум проходил в Дублине (США). Цель его проведения декларировалась следующая: формирование совершенно новых подходов к эффективному поиску информации в библиотечных системах [8, 9]. Вполне возможно, что «замыкаться» в рамках некоторого, по сути дела, «библиотечного» стандарта для формирования совокупности образовательного контента систем электронного обучения не имеет смысла.

В свою очередь, модели, использующие совокупность классификаторов, являются наиболее простыми моделями реализации поиска некоторого контента [4–8, 12–15]. Документ в этой модели представляется в виде множества ассоциированных с ними атрибутов. Однако, в отличие от дискрипторных моделей, такими атрибутами являются идентификаторы иерархических классов, к которым, в соответствии с некоторыми критериями, принадлежит искомый документ. А запрос пользователя относительно поиска специфического контента (релевантного такому запросу пользователя документа) может быть представлен либо в виде указания некоторого класса (подкласса), зафиксированного в определенном классификаторе, либо же одновременно нескольких классов и подклассов, которым должен он соответствовать. И такой путь авторам представляется более перспективным, чем поиск соответствия определенной спецификации «библиотечного» стандарта.

Большинство из указанных выше моделей поиска и формирования совокупности образовательного контента, как правило, формализуются и формулируются в виде совокупности булевых функций. А непосредственно термами запросов пользователей системы электронного обучения в этих булевых функциях являются либо конкретные слова и словосочетания, либо идентификаторы классов некоторого классификатора, либо же значения элементов метаданных (если применяется модель, использующая «дублинское ядро»). В свою очередь, критерий релевантности контента некоторому запросу – значение булевой функции равное логической единице [6, 7].

После формирования и предварительного анализа совокупности релевантного некоторому запросу контента, для проектирования индивидуального образовательного трека авторизованного пользователя системы электронного обучения необходимо осуществить своеобразное ранжирование документов, предоставляемых ему для ознакомления с их содержанием (сформировать своего рода очередность ознакомления с контентом). И на первых этапах эволюции систем электронного обучения формализация указанного нами выше ранжирования осуществлялась с помощью совокупности расширенных булевых функций. Эти функции позволяли в некотором смысле акцентировать внимание пользователя на определенном контенте. С такой целью применялись различные весовые коэффициенты, числовые значения

которых позволяли сформировать своеобразную иерархию контента в процессе предоставления информации пользователю.

При проектировании и создании систем электронного обучения также активно применяются так называемые векторные модели поиска учебных материалов [4, 10–15], которые позволяют ранжировать итоговое множество искомого образовательного контента, путем анализа *n*-мерных векторов f_j, компонентами которых являются веса b_{ij}, соответствующие запросам *t*. В такой модели корреляция между векторами, отображающими некоторый запрос и документ, является своеобразной оценкой его релевантности. В ряде научных публикаций зарубежных авторов было предложено этот параметр определять как скалярное произведение указанных выше *n*-мерных векторов f_j [5–8].

По нашему мнению, отдельного внимания заслуживают вероятностные модели поиска релевантного образовательного контента и так называемые «сети вывода». Синтез первых из них основан на принципе вероятностного ранжирования контента, а вторых – ранжирования относительно вероятности того, что данный документ соответствует нескольким взаимосвязанным запросам одного и того же пользователя системы электронного обучения. Во втором случае алгоритм интеллектуального поиска релевантных документов представляет собой своеобразную последовательность логических рассуждений в условиях наличия некоторого уровня неопределенности. Цель такого логического рассуждения – успешно формализовать так называемую «историю» осуществления процесса электронного обучения пользователя, отследив «движение» вдоль индивидуального образовательного трека. Однако в любом случае абсолютно все перечисленные выше модели формируют своеобразную палитру эффективного инструментария для решения задач функционирования поискового робота системы, реализующего поддержку успешного функционирования системы электронного обучения.

Далее мы уделим внимание самому процессу реализации интеллектуального поиска образовательного контента в системе электронного обучения. Формирование интегрированной иерархической совокупности структурированной информации и представление ее в виде определенного цельного учебного курса в рамках образовательной программы, реализуемой в форме электронного обучения, осуществляется путем синтеза логической последовательности некоторого контента, предоставляемого обучаемому для формирования его индивидуально образовательного трека. Отдельные информационные единицы (или же «образовательные кванты») указанной выше методически обоснованной последовательности предъявления контента пользователю будем далее именовать объектами. Этим объектам присущи свойства, обусловленные спецификой реализации педагогической деятельности, осуществляемой в дистанционном формате [10–15]. А синтезируемую авторами систему поддержки процессов электронного обучения с интеллектуальным поиском образовательного контента будем пытаться реализовывать с применением отмеченного нами выше по тексту полиагентного подхода.

В первую очередь, как утверждает ряд исследователей [4–9], необходимо сформировать некоторый оптимальный регламент взаимодействия всей совокупности агентов. В частности, взаимоотношения между участниками своеобразного сообщества агентов, каждый из которых фигурирует в соответствующем перечне (каталоге), будут нами устанавливаться посредством функционирования сервиса информационных сообщений. А действия таких агентов – контролироваться и координироваться специальным сервисом, реализующим идентификацию пользователей системы электронного обучения и контента, а также компонентом, контролирующим допустимый формат наименований (имен). Кроме того, необходимо реализовать всеобъемлющее формальное описание некоторой предметной области в целом, а также ее фрагментов, которые характерны для функционирования отдельных агентов, из указанной выше их совокупности. Естественно, вся информация как относительно контента, так и об информационной деятельности множества агентов фиксируется в весьма объемной базе данных. Таким образом, мы концентрируем внимание не на самом контенте, а, по сути дела, на процессе его оптимального формирования с помощью совокупности специальных программных средств (агентов).

Для начала сформируем некоторое конечное множество $DS = \{DS_1, DS_2, \ldots, DS_n\}$ возможных ситуаций относительно функционирования указанной нами выше интеллектуальной

подсистемы поиска контента системы поддержки осуществления процессов электронного обучения. Первая из указанного выше множества ситуация DS_1 соответствует реализации процессов интеллектуального поиска релевантного запросам пользователей системы электронного обучения образовательного контента во внешней и внутренней информационной среде. Вторая ситуация DS_2 соответствует осуществлению системного анализа предварительно отобранного контента и его структурированию. Третья ситуация DS_3 – синтез индивидуального образовательного тренда пользователя системы путем формирования логически обоснованной последовательности (или последовательностей) предоставления пользователю контента (критерий для формирования последовательности – релевантность образовательной цели программы обучения). Четвертая ситуация DS_4 – предоставление пользователю последовательного доступа к контенту для его предварительного просмотра и установления соответствия индивидуальным образовательным целям, а также полноты и адекватности предоставляемой информации. Пятая ситуация DS_5 связана с осуществлением коррекции структуры и содержания сформированного индивидуального пакета образовательного контента, а также возможным удалением части информации и заменой ее некоторой иной информацией. И еще одна ситуация DS_6 определяет иерархическую совокупность действий по окончательному (на определенный момент времени) формированию пакета контента и его сохранению в базе данных.

Непосредственное функционирование интеллектуальной полиагентной поисковой подсистемы, как неотъемлемой составной части системы поддержки процессов осуществления электронного обучения, реализуется на практике при участии нескольких видов агентов, а именно: поисковый робот или агент-поисковик – F_1; агент реализующий предварительный анализ контента, его оценку соответствия некоторым критериям и структурирование информации – агент-аналитик F_2; агент-координатор F_3, который координирует все действия в соответствии с образовательной целью, структурой и содержанием образовательной программы и формирует индивидуальный образовательный трек; агент-индексатор F_4, который фиксирует контент в базе данных, устанавливая при этом соответствие этого контента и определенного пользователя системы. При этом, агент аналитик F_2 использует некий компаративный инструмент. Он позволяет на основании ряда критериев принять решение относительно соответствия или несоответствия некоторого контента предметной области и синтезированной дескрипторной модели поиска информации для формирования индивидуального образовательного трека. Также он определяет перспективы осуществления дальнейшего более глубокого поиска информации в данном направлении или на определенном информационном портале.

Поисковый робот F_1 не только реализует непосредственно поисковые операции в глобальном и локальном информационном пространстве, но и идентифицирует соответствующие метаданные, если такие имеются в наличии. Он также вполне может идентифицировать всевозможные дополнительные данные, которые определенным образом характеризуют контент. На основе таких данных принимаются решения агентом-аналитиком F_2. В свою очередь, агент-индексатор F_4 самостоятельно генерирует метаданные. Он основывает свое функционирование на некотором алгоритме или же модели, которые позволяют формально описать контент, найденный поисковым роботом F_1, используя при этом булевы функции (по сути дела – создать логический образ контента).

На первый взгляд, в некотором смысле задачи индексации и поиска по метаданным упрощаются, если следовать рекомендациям стандартов Learning Object Metadata (LOM), и Sharable Content Object Reference Model (SCORM), разработанных одним из «законодателей мод» в сфере практического применения ИКТ американским Институтом инженеров электротехники и электроники (IEEE) для систем дистанционного обучения. В этих рекомендациях утверждается, что образовательным ресурсам должны быть присущи некие специфические метаданные. Именно такие метаданные, по мнению разработчиков стандарта, должны характеризовать контент как образовательный и пригодный для осуществления процессов электронного обучения.

Однако, как правило, сложность реализации таких действий разработчиком системы на практике заключается в том, что указанные выше метаданные, соответствующие образовательным ресурсам, являются разнородными и, поэтому, достаточно трудно

формализуются. Кроме того, эти стандарты LOM и SCORM носят, к сожалению, лишь рекомендательный характер. Поэтому многочисленные разработчики различного образовательного контента, как правило, не считают необходимым выполнять требования совокупности положений данных стандартов. Это создает некоторую информационную турбулентность и формирует достаточно высокий уровень энтропии относительно принятия управленческих решений агентом-координатором F_3, являющимся одним из центральных компонентов системы поддержки осуществления электронного обучения и управления им. Не всегда являются однозначными и соответствия между параметрами запросов пользователей системы и метаданными контента.

С учетом приведенной выше информации, авторами предложена некоторая семантическая модель, предусматривающая два направления осуществления предварительного анализа при реализации поиска релевантного запросам образовательного контента в системе электронного обучения. Это – создание специфического образа самой предметной области, а также создание образа процесса поиска релевантного контента. В дальнейшем необходимо осуществить взаимную «увязку» таких образов, сформированных с применением ряда инструментов формализации. Во-первых, такая модель основывается на предположении о том, что установить в явном виде соответствие некоторого контента запросу конкретного пользователя достаточно сложно. Поэтому в данном случае речь идет о решении задачи непрямой идентификации. Одним из способов эффективного ее решения является применение своеобразного компаратора. А компаратор как средство реализации функции сравнения значений параметров, характеризующих некоторые объекты или процессы, формирует на своем выходе один из двух возможных сигналов Z, а именно: «Истинное значение» (или логическая единица – Z = 1) и «Ложное значение» (логический нуль – Z = 0), в зависимости от состояния входов $X_1, X_2, X_3,.., X_m$.

С точки зрения решения задачи создания некоторого программного средства, реализующего функцию принятия решения относительно релевантности (или нерелевантности) образовательного контента индивидуальным запросам пользователя электронной обучающей системы, такой компонент должен формировать результат логического типа на основании выполнения совокупности логических операций над определенными объектами (логическими величинами и термами). В программировании такое средство достаточно часто именуют предикатом. А если же быть более точным, то предикат находится с субъектом в предикативном отношении, а также выявляет и демонстрирует наличие (или же отсутствие) у предмета некоторого специфического признака. Субъект – это некоторая сущность, которая способна в определенных обстоятельствах изменять свои свойства. Таким образом, процесс установления релевантности образовательного контента некоторому запросу может быть формализован путем синтеза предиката или совокупности предикатов следующего вида $K(X_1, X_2, X_3, .., X_m) = Z$. В свою очередь, значения логических переменных $X_1, X_2, X_3,.., X_m$ являются некоторым логическим итогом осуществления совокупности информационных процессов, сущность которых может быть представлена и формализована с помощью более или менее широкого множества предикатов K_j, где $j = 1, 2, \ldots, l$, а l – общее количество признаков, используемых для формирования метаданных.

При формировании алгоритмов осуществления поиска образовательного контента необходимо синтезировать некую форму представления знаний о реальном мире или его части (предметной области), которую в программировании именуют предметной онтологией, в рамках реализуемой в электронной форме образовательной программы, а также в полном соответствии с учебным и тематическим планами. Тем самым, по сути дела, нужно определить множество дескрипторов (ключевых слов и словосочетаний), с помощью которых можно было бы формально описать предметную область. В научной литературе некоторые авторы утверждают, что для адекватной реализации данной задачи достаточно уделить внимание лишь ключевым словам (словосочетаниям), которые могут фигурировать только в заголовках электронных документов, ключевых словах или же ссылках. Утверждение этих исследователей основаны на том, что в большинстве электронных ресурсов эти дескрипторы присутствуют в соответствующих тегах [3–9] и это определяется спецификой формирования Интернет-ресурсов. На практике же все оказывается несколько сложнее, чем в приведенных нами выше теоретических умозаключениях.

Считая реализацию указанных выше условий вполне достаточной для осуществления эффективного поиска релевантного запросам пользователей системы электронного обучения контента, исследователи, как правило, предлагают синтез логической модели релевантности основывать не на условии, которое верно для всех обозначенных элементов (квантор всеобщности), а на условии истинности лишь для некоторых логических высказываний (кванторе существования). В частности, релевантность контента некоторой теме образовательной программы может быть определена предикатом (1), согласно логике которого, если хотя бы одно слово (словосочетание) в заголовке электронного ресурса, либо ключевое слово (слова), либо слово в соответствующих ссылках соотносится с темой релевантного поиска, то в целом этот ресурс является релевантным.

$$R = P(k, w, r, t) = P_k(k,t) \vee P_w(w,t) \vee P_r(r,t)\ , \qquad (1)$$

где R – бинарная оценка релевантности некоторого веб-ресурса поисковому запросу, которая может принимать значения либо логического нуля, либо логической единицы (релевантен или нерелевантен). Она может быть определена как предикат $P(k, w, r, t)$; t – тема поиска; h – слова в заголовке электронного документа; k – ключевые слова; r – слова в ссылках на веб-ресурс.

В свою очередь входящие в выражение (1) предикаты раскрываются через соответствующие предикаты следующим образом:

$$P_k(k, t) = P_k(k, t_1) \vee P_k(k, t_2) \vee \ldots \vee P_k(k, t_l),$$

$$P_w(w, t) = P_w(w, t_1) \vee P_h(w, t_2) \vee \ldots \vee P_h(w, t_l),$$

$$P_r(k, t) = P_r(k, t_1) \vee P_r(k, t_2) \vee \ldots \vee P_r(k, t_l),$$

По мнению авторов, указанной выше совокупности предикатов недостаточно для успешного формирования адекватной совокупности образовательного контента, соответствующего запросам совокупности авторизованных пользователей и программе обучения. Необходим также интеллектуальный поиск контента, который соответствует большей части индивидуальных запросов пользователей такого рода системы реализации процессов электронного обучения. Кроме того, важно отследить динамику изменения структуры и содержания запросов пользователей в процессе осуществления обучения по образовательной программе от первоначального этапа до ее финальной части. Такая информация, в частности, предоставит возможность понять степень заинтересованности участников образовательных процессов в получении знаний в выбранной ими предметной области, а также динамику степени информированности относительно различных аспектов и проблем, имеющихся в наличии.

Вполне возможно синтезировать также несколько иную структуру указанных выше предикатов. Таким образом, использование метода сравнительной идентификации предоставляет возможность разработчикам программных средств реализовать тематический поиск учебных электронных ресурсов в рамках системы электронного обучения, что является только лишь первым этапом формирования учебного контента.

Заключение. В данной статье авторы предложили модернизированную концепцию синтеза полиагентного компонента информационного поиска учебных ресурсов системы осуществления электронного обучения. Предложена компонентная архитектура на четырех типах агентов: агент-поисковик, агент-аналитик, агент-координатор, агент-индексатор. Это позволило уделить внимание таким аспектам интеллектуального поиска образовательного контента, как идентификация объектов по метаданным, оценка релевантности контента образовательным целям и индексирование результатов поиска. Также, авторы смогли определить некоторое конечное множество возможных ситуаций DS относительно функционирования интеллектуальной подсистемы поиска контента системы поддержки осуществления процессов электронного обучения. В дальнейшем будет предложена и обоснована семантическая модель, предусматривающая два главных направления осуществления предварительного анализа при реализации поиска релевантного запросам образовательного контента в системе электронного обучения. Это создание специфического образа самой предметной области, а также создание образа процесса поиска релевантного

контента. Кроме того, авторы предложили осуществлять взаимную «увязку» таких образов, сформированных с применением ряда инструментов формализации.

ON THE ISSUE OF FORMING A DATABASE OF THE E-LEARNING PROCESS SUPPORT SYSTEM

S.L. YABLOCHNIKOV, I.O. YABLOCHNIKOVA, K.F. SHAKIROV

Abstract

The results are presented regarding the synthesis of the database of the e-learning implementation support system, as well as algorithms for the formation of a set of educational content that provides users with following along an individual track. Attention is paid to such aspects of intelligent search for educational content as identification of objects by metadata, assessment of the relevance of content to the educational goals of system users and indexing of search results. The authors have implemented an attempt to determine a finite set of possible DS situations regarding the functioning of an intelligent content search subsystem.

Список литературы

1. Komis, V. Computer-supported collaborative concept mapping: Study of synchronous peer interaction / V. Komis, N. Avouris, C. Fidas // Education and Information Technologies. – 2002. – Vol. 7 (2). – P. 169–188.

2. Suthers, D. D. Architectures for computer supported collaborative learning / D. D. Suthers // Proceedings IEEE International Conference on Advanced Learning Technologies, Madison, WI, USA. – 2001. – P. 25–28.

3. Saeedi, R. Collaborative Multi-Expert Active Learning for Mobile Health Monitoring: Architecture, Algorithms, and Evaluation / R. Saeedi, K. Sasani, A. Gebremedhin // Sensors (Basel). –2020. – № 20 (7). – 1932 p.

4. Wooldridge, M. J. An introduction to multiagent systems / M. J. Wooldridge // John Wiley&Sons, LTD. – 2009. – 461 p.

5. Li, Z. Cooperative Control of Multi-Agent Systems: A Consensus Region Approach / Z. Li, Z. Duan // CRC Press. – 2014. – 252 p.

6. Salton, G. Extended Boolean information retrieval / G. Salton, E. Fox, H. Wu // Communications of the ACM. – 2001. – Vol. 26, № 4. – P. 35–43.

7. Baker, T. Libraries, languages of description, and linked data: a Dublin Core perspective / T. Baker // Library Hi Tech. – 2012. – Vol. 30, № 1. – P. 116–133.

8. Swanson, E. B. Distributed decision support systems: a perspective / E. B. Swanson // Twenty-Third Annual Hawaii International Conference on System Sciences, Kailua-Kona, HI, USA. – 1990. – Vol. 3. – P. 129–136.

9. Lee, T. Asynchronous, distributed, decision-making systems with semi-autonomous entities: a mathematical framework / T. Lee, S. Ghosh, A. Neerode // IEEE Trans Syst Man Cybern B Cybern. – 2000. – № 30 (1). – P. 229–239.

10. Яблочников, С. Л. Управленческие аспекты образовательной сферы / С. Л. Яблочников // Актуальные проблемы бизнес-образования : материалы X междунар. науч.-практ. конф., Минск, 27–28 апр. 2011 г. / Белорус. гос. ун-т. – Минск, 2011. – С. 205–207.

11. Jablochnikov, S. L. Dynamic Models of Management of Pedagogikal Systems / S. L. Jablochnikov // IDIMT-2010. Information Technology – Human Values, Information and Economy. Linz: Trauner. – 2010. – P. 243–249.

12. Jablochnikov, S. Management Process in Education Sphere in the Limit of System-Cybernetic Approach / S. Jablochnikov // IDIMT–2013. Information Technology – Human Values, Innovation and Economy. 21th Interdisciplinary Information Management Talks, Sept. 11–13, 2013. Prague, Czech Rep. – P. 307–312.

13. Jablochnikov, S. Aspects of Safety of the education Systems / S. Jablochnikov // IDIMT- 2012 ICT Support for Complex Systems – 20th Interdisciplinary Information Management Talks. Linz: Trauner Verlag, 2012. – P. 359–362.

14. Modeling of the Educational Process Based on Smart Technologies / S. Yablochnikov [et al.] // System Analysis in Engineering and Control. SAEC 2021. Lecture Notes in Networks and Systems. – Vol. 442.

15. Yablochnikov, S. On the issue of modelling educational processes / S. Yablochnikov // IDIMT-2021. Pandemics: Impacts, Strategies and Responses 29th Interdisciplinary Information Management Talks. Sept. 1–3, 2021 Kutná Hora, Czech Republic. TRAUNER Verlag. Austria, 2021. – P. 451–457.

КИБЕРФИЗИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

УДК 530.145:538.915: 621.382

ТУННЕЛИРОВАНИЕ ЧЕРЕЗ ЦИЛИНДРИЧЕСКИЙ БАРЬЕР

Ю.И. БОХАН

Витебский филиал учреждения образования «Белорусская государственная академия связи», ул. Ильинского, 45, Витебск, 210001, Беларусь
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2818-8039

Поступила в редакцию 24 июля 2023

Рассматривается задача о туннелировании в потенциальном барьере цилиндрической симметрии. Определены энергетические состояния внутри потенциального барьера. Показано, что использование углеродных нанотрубок позволяет создать барьерную структуру для приема и детектирования электромагнитных волн терагерцового диапазона.

Ключевые слова: углеродная нанотрубка, потенциальный барьер, цилиндрические координаты, энергетические состояния.

Введение. В настоящее время для детектирования слабых потоков электромагнитного излучения используются элементы, принцип работы которых основывается на возбуждении квантовых состояний в структурных составляющих материалов. В то же время для детектирования электромагнитных полей радиочастотного диапазона используются макроскопические свойства материалов, которые изменяют свои параметры под воздействием внешнего поля. Для детектирования слабых полей требуется система усиления сигнала, которая часто представляет собой сложную систему полупроводниковых элементов с большим уровнем шума. В этой связи особый интерес представляет регулярная структура резонансно-туннельных диодов, позволяющая за счет резонансного переноса резко усилить сигнал без искажения формы. Основной путь решения проблемы состоит в создании многобарьерного наноструктурного материала, работающего по принципу резонансного переноса заряда и имеющего внешнее управление электромагнитным полем.

Применение углеродных нанотрубок для целей генерации/приема электромагнитного излучения терагерцевого диапазона привлекает все большее внимание ввиду высокой степени миниатюризации и возможности создания высокочувствительных приемных устройств [1–3]. Это связано в первую очередь возможностью приема слабых сигналов с высоким отношением сигнал/шум из-за отсутствия паразитных помех ввиду избирательности приемного устройства.

Резонансное туннелирование и эффект отрицательной дифференциальной проводимости в наноструктурах вызваны чисто квантовыми явлениями пространственного квантования, приводящего к возникновению резонансных энергетических уровней. Как известно, отрицательная дифференциальная проводимость обеспечивает возможность генерации электромагнитного поля [4].

Основная часть. Решение поставленной задачи предварим замечанием о возможности создания внутри углеродной нанотрубки дополнительной системы состояний путем внедрения по оси нанотрубки ионов. Это часто ионы металлов, имеющие подходящую структуру орбиталей для устойчивого размещения (рис. 1) [1].

С точки зрения резонансного туннелирования, система с осевым расположением ионов обладает гораздо более богатой структурой состояний, что способствует появлению близких уровней при резонансном переходе. Кроме того, такая структура обладает большей чувствительностью к внешнему воздействию электромагнитным полем. В такой структуре

всегда найдется пара состояний, обеспечивающих поглощение/испускание кванта электромагнитного излучения.

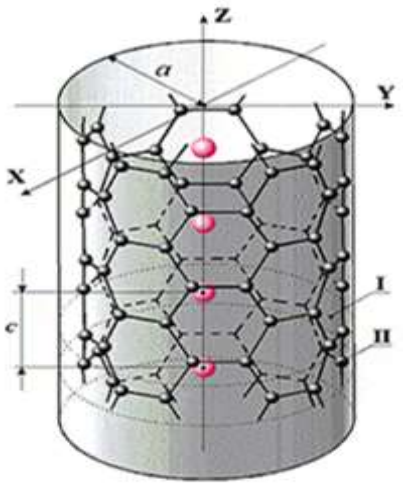


Рис.1. Легированная металлом (цветные шарики) углеродная нанотрубка цилиндрического потенциального барьера:
I – область постоянного межатомного потенциала; II – область атомного потенциала. [1]

Для нахождения спектра внутри потенциального барьера требуется решить уравнение Шрёдингера в цилиндрической системе координат. Здесь следует отметить, что при рассмотрении процессов туннелирования обычно решается одномерная задача [4–5], как правило, в декартовой системе координат. Однако, как будет показано ниже, решение в цилиндрической системе координат обладает более богатым спектром состояний. Так же отметим, что решение уравнения Шрёдингера в цилиндрической системе координат известно давно [6], причем в самом общем виде [7]. Для целей анализа условий резонансного туннелирования изложим в кратком варианте решение первой краевой задачи в методе разделения переменных.

Запишем уравнение Шрёдингера в цилиндрической системе координат:

$$-\frac{\hbar^2}{2M}\left[\frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial\rho}\rho\frac{\partial\psi}{\partial\rho}+\frac{1}{\rho^2}\frac{\partial^2\psi}{\partial\phi^2}+\frac{\partial^2\psi}{\partial z^2}\right]+U_0\,\psi=E\psi. \quad (1)$$

Здесь на величину потенциала наложено условие (U_0 – высота барьера):

$$\boldsymbol{U}=\begin{cases}U_0 & 0\le\rho\le R;\,0\le z\le l,\\ 0 & \rho>R,\ z>l.\end{cases} \quad (2)$$

Решение первой краевой задачи, в методе разделения переменны, запишем в виде:

$$\psi(\rho,\phi,z)=CJ_n(k\rho)e^{i(m\phi+\frac{jz}{l})}, \quad (3)$$

где $k^2 = [2M\,(U_0 - E)/h^2]$, $J_n(x)$ – функция Бесселя целого индекса.

Спектр состояний внутри барьера:

$$E_{nm}=\frac{\hbar^2}{2M}\left(\frac{\lambda_{nm}^2}{R^2}+\frac{\pi^2 j^2}{l^2}\right), \quad (4)$$

где λ_{nm} – корни уравнения $J_n(kR)=0$, n,m,j =0,1,2,3 …….

Такое выражение для спектра состояний обусловлено выбранным методом разделения переменных. В направлении z волновые функции имеют вид синусов или косинусов, а в плоскости r и φ определяются функциями Бесселя, в которые входит m, играющее роль «магнитного» квантового числа.

Некоторые значения корней уравнения $J_n(kR) = 0$ представлены в таблице 1, (m = 0).

Таблица 1

Первые пять корней функций Бесселя целого индекса

Корни	$J_0(x) = 0$	$J_1(x) = 0$	$J_2(x) = 0$	$J_3(x) = 0$
1	2,405	3,832	5,136	6,380
2	5,520	7,016	8,417	9,761
3	8,654	10,173	11,620	13,015
4	11,791	13,324	14,796	16,223
5	14,931	16,471	17,960	19,409

Вид волновых функций в зависимости от аргумента и индекса (m = 0) представлен на рис. 2.

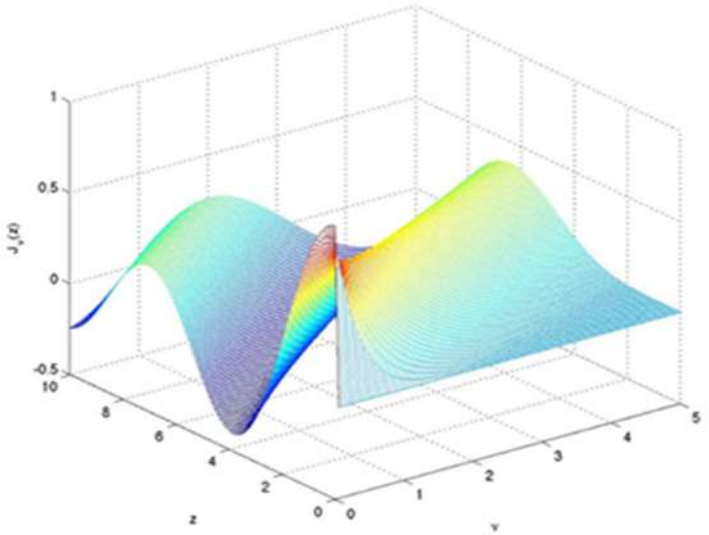


Рис. 2. Вид функции Бесселя в зависимости от аргумента и индекса

Исходя из вида волновых функций, следует отметить, что появляется несколько дополнительных слагаемых в выражении для тока через барьер. Рассматривая активную и реактивные составляющие тока [4], получим (ρ = kr):

$$I_{\nu\mu}^{a} = -ie\left(\psi_{\nu}^{*}\nabla\psi_{\mu} + \psi_{\mu}^{*}\nabla\psi_{\nu}\right). \quad (5)$$

Проведя несложные, но громоздкие преобразования с использованием представления градиента в цилиндрических координатах и соотношения между функциями Бесселя:

$$\frac{d\,J_n(\rho)}{d\rho} = \frac{n}{\rho}\,J_n(\rho) - J_{n+1}(\rho), \quad (6)$$

получим для компонент вектора тока следующие выражения (константу C опускаем):

$$I_{\rho} = -ie\left(\frac{\mu+\nu}{\rho}\left[J_{\nu}(\rho)J_{\mu}(\rho) - J_{\nu}(\rho)J_{\mu+1}(\rho) - J_{\mu}(\rho)J_{\nu+1}(\rho)\right]\right), \quad (7)$$

$$I_\varphi = e\left[\frac{m}{\rho}\mathrm{J}_\nu(\rho)\mathrm{J}_\mu(\rho)\right], \quad (8)$$

$$I_z = e\left[\frac{j}{l}\mathrm{J}_\nu(\rho)\mathrm{J}_\mu(\rho)\right]. \quad (9)$$

Следует отметить, что радиальная составляющая тока входит только в реактивную часть, а угловая и продольная – в активную часть.

В потенциальном барьере, имеющем цилиндрическую симметрию, возникает система неэквидистантных состояний. Поэтому включение внешнего поля величиной **E** позволяет снять вырождение по продольному квантовому числу **j** и расширить количество резонансных состояний в туннельном барьере. Такое расширение приводит к появлению дополнительных пиков на зависимости амплитуды переменного тока от частоты внешнего поля.

Появление дополнительных пиков протекающего тока служит указанием на возбуждение туннельной системы внешним полем. Поэтому, изменяя величину поля, можно осуществлять резонансную настройку системы нанотрубок на определенную частоту внешнего поля. При этом следует отметить, что зависимости активных составляющих тока имеют почти одинаковый вид. Это приводит к движению тока в виде спирали, т. е. наиболее вероятное движение может осуществляться через состояния с большими значениями **μ** и **ν** (рис. 2). Отсюда следует, что реактивная составляющая тока может менять знак (7), что приведет к появлению усиления сигнала.

Наличие пути движения тока через состояния с большими значениями **μ** и **ν**, из-за свойства перемежаемости корней уравнения $\mathrm{J}_n(\mathrm{kR}) = 0$, дает возможность управления частотной зависимостью тока от внешнего поля. Действительно, разность величин $\mathbf{E}_{\mathbf{nm}}$ для различных значений *n* и *m*, может быть сделана близкой к терагерцовому диапазону частот. Дополнительная настройка в резонанс может быть осуществлена подстройкой «продольной» составляющей тока, зависящей от длины нанотрубки за счет поляризации внешнего поля.

Все вышеизложенное может служить аргументацией для исполнения приемной антенны на углеродных нанотрубках (рис. 3).

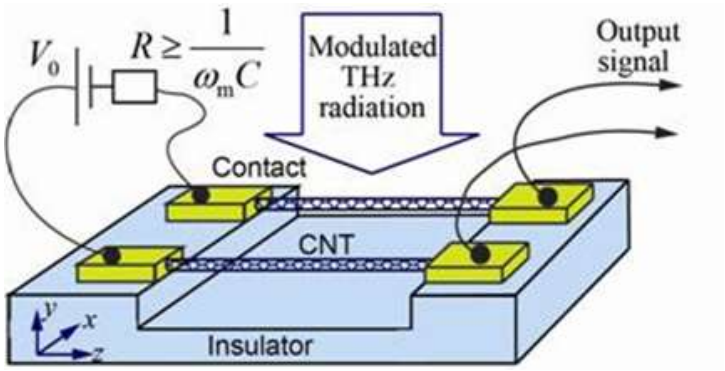


Рис. 3. Модель приемной антенны на двух нанотрубках [2]

Такая система является чисто электрической и допускает широкий интервал значений потенциала для настройки в резонанс с внешним полем.

Это свойство необходимо, потому что такая система нанотрубок обладает высокой чувствительностью резонансного туннелирования к величине внешнего поля. Создание регулярной решетки из РТД позволит разработать приборы, отображающие падающие электромагнитные волны с частотой до десятков терагерц. Такие решетки могут найти широкое применение не только в приемных устройствах, но и для чувствительных сенсоров медицинского назначения.

В то же время немалый интерес представляет и обратный процесс – квазирезонансное поглощение внешнего поля в такой структуре. Такое поглощение приводит к изменению условий прохождения барьера и, соответственно, изменение величины тока и электрического поля [5].

Результаты и обсуждение. В реальной ситуации появляется потребность учета влияния всегда присутствующего взаимодействия между электронами на процессы квантовой интерференции и резонансного туннелирования. Последнее следует из того, что сдвиг резонансного уровня за счет взаимодействия на величину малую по сравнению с энергией электрона ε_R, но сопоставимую с шириной резонансного уровня δ, резко изменяет резонансный ток. Такой сдвиг может быть обусловлен приложением внешнего поля, причем низкой частоты.

Заключение. Создание регулярной решетки из РТД позволит разработать приборы, отображающие падающие электромагнитные волны с частотой до десятков терагерц. Такие решетки могут найти широкое применение не только в приемных устройствах, но и для чувствительных сенсоров медицинского назначения.

TUNNELING THROUGH THE CYLINDRICAL BARRIER

YU.I. BOKHAN

The problem about tunneling in a potential hill of cylindrical symmetry is considered. Energy states in a potential hill are spotted. It is shown that use carbon nanotube allows to create barrier structure for reception and detection of terahertz band of electromagnetic waves.

Список литературы

1. Дьячков, П. Н. Электронные свойства и применение нанотрубок / П. Н. Дьячков. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. – 488 с.

2. Семененко, В. Л. Система из двух углеродных нанотрубок как антенна и детектор терагерцевого излучения / В. Л. Семененко [и др.] // Журнал радиоэлектроники. – 2012. – № 6. – С. 2–15.

3. Запороцкова, И. В. Сенсорные свойства углеродных нанотрубок / И. В. Запороцкова [и др.] // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. – 2017. – Т. 20, – № 1. – С. 5–21.

4. Елесин, В. Ф. К теории когерентной генерации резонансно-туннельного диода / В. Ф. Елесин // ЖЭТФ. – 1999. – Т. 116. – Вып. 2(8). – С. 704–716.

5. Monsen, Razavy Quantum theory of tunneling / Razavy Monsen // 2nd Edition. World Scientific Publishing Co. – 2014. – 792 p.

6. Янке, Е. Специальные функции. Формулы, графики, таблицы. / Е. Янке, Ф. Эмде, Ф. Лёш. – М. : Наука, 1964. – 345 с.

7. Полянин, А. Д. Справочник по линейным уравнения математической физики / А. Д. Полянин. – М. : ФИЗМАТЛИТ, – 2001. – 576 с.

8. Bokhan, Yu. I. Quantum states in a cylindrical quantum hole and a barrier / Yu. I. Bokhan // IX International science conference «Actual Problems of Solid State Physics». Minsk. 2021. Book of abstract. – P. 226–227.

9. Бохан, Ю. И. Регулярная система резонансно туннельных диодов для анализа сигналов / Ю. И. Бохан // XXVII Международная конференция «Современные средства связи». – Минск. – 2022. – С. 158–160.

УДК 123;616.894-053.8-07

ИТ-ДИАГНОСТИКА БОЛЕЗНИ АЛЬЦГЕЙМЕРА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ГОЛОСОВОЙ ИНФОРМАЦИИ

В.А. ВИШНЯКОВ[1], Ю. ЧУЙЭ[2]

[1]*Учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», ул. П. Бровки, 6, Минск, 220600, Беларусь*
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2929-8958

[2]*Учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», ул. П. Бровки, 6, Минск, 220600, Беларусь*
ORCID: https://orcid.org/0009-0009-2342-1856

Поступила в редакцию 15 июня 2023

Рассматривается использование машинного обучения для распознавания болезни Альцгеймера по фонологическим данным на ранней стадии заболевания. Данные, используемые в процессе анализа, взяты из набора данных AdeSS2020 Challenge dataset, который содержит голосовую информацию как пациентов с болезнью Альцгеймера (для обучения нейронной сети), так и пациентов для распознавания. Подход, используемый в этой статье, основан на модели классификации с использованием машинного обучения. Сначала из голосовых данных были извлечены как фонологические, так и семантические признаки, затем выполнено машинное обучение нейронной сети на основе этих признаков с использованием алгоритма случайного леса. Использован также алгоритм GridSearchCV для оптимизации гиперпараметров классификатора случайного леса. В процессе распознавания болезни Альцгеймера точность классификации модели достигла 85 %.

Ключевые слова: машинное обучение, алгоритм случайного леса, нейронная сеть, параметры оптимизации, точность.

Введение. Потеря памяти и нарушение речи являются одними из самых ранних симптомов болезни Альцгеймера. Они стали направлением, в котором ученые работают, чтобы помочь диагностировать заболевание пациентам с болезнью Альцгеймера (БА) с помощью машинного обучения классификатора на базе нейронной сети.

Развитие технологии Интернета вещей (IoT) позволило обеспечить безопасность пациентов с помощью кнопок экстренной помощи, систем глобального позиционирования, интеллектуальных детекторов и т. д. [1]. Достижения в области машинного обучения позволили с помощью ИТ-диагностики обнаруживать изменения в голосе и фонологическом ритме, которые не всегда врачи могут обнаружить на слух. Произношение при болезни Альцгеймера характеризуется вариациями различных временных и акустических фонологических параметров с клиническими симптомами дисфазии, то есть нарушением называния, понимания на слух и письменно, беглой, но невнятной речью и разговором с семантическими ошибками [2].

Известные результаты исследований. Зарубежные исследователи проводили ИТ-анализ вербальных и лингвистических расстройств для пациентов с БА. В статье [3] авторы извлекли переменные из повествовательной речи пациентов с болезнью Альцгеймера, в ходе исследовательского анализа отобрали более 370 доступных признаков для построения модели и достигли 81,92 % точности классификации при отличии пациентов от здоровой контрольной

группы. В работе [4] авторы использовали три алгоритма, основанных на статистических и нейронных методах, для встраивания вербальных аудиосигналов с использованием N-граммы, i-вектора и x-вектора и достигли точности дифференцирования 83,6 % в наборе данных pitt Corpus.

Авторы статьи использовали машинное обучение в качестве методологии для идентификации болезни Альцгеймера, комбинируя фонологические признаки с семантическими для достижения различия между пациентами с болезнью Альцгеймера и здоровыми контрольными группами, используя модель TfidfVectorizer, классификатор случайных лесов и алгоритм GridSearchCV.

Набор данных ADeSS challenge dataset и модель TfidfVectorizer. Исходные данные были получены из набора данных ADeSS challenge dataset [5], основной целью которого является внедрение распознавания БА, при котором можно систематически сравнивать различные методологии. Набор данных содержит 1955 голосовых сегментов от 78 участников, являющихся пациентами, и 2122 голосовых сегмента от 78 участников, не являющихся пациентами с БА, причем записи были акустически улучшены с помощью удаления стационарного шума.

В наборе данных использовалось задание по описанию картинки «кража печенья» из Бостонского диагностического исследования афазии [6], чтобы вызвать повествовательную речь. Протокол предписывал интервьюерам показывать фотографию пациентам и поощрять их описывать картинку как можно подробнее. Доступный набор данных содержит полный улучшенный звук и стандартизированные аудиоблоки. В данной статье было использовано полное дополненное аудио и соответствующие транскрипции. Расшифрованные тексты были предоставлены dataset, все расшифровки были аннотированы с использованием системы кодирования ЧАТА [7]. К каждой расшифровке прилагается аудиофайл, позволяющий проводить параллельный лексический и акустический анализ.

TfidfVectorizer − это реализация с открытым исходным кодом для обработки текста на естественном языке, его центральной концепцией является метод TF-IDF (Term frequency − обратная частота документа), распространенный метод взвешивания для поиска информации и интеллектуального анализа данных. Основная идея метода TF-IDF заключается в том, что если слово или фраза встречается в статье с высокой частотой и редко встречается в других статьях, считается, что они имеют высокую релевантность для документа, что означает, что слово или фраза обладают хорошей способностью дифференцировать категории, которые подходят для классификации.

TfidfVectorizer использует частоту обратной области (IDF) и частоту терминов (TF) слов для вычисления их соответствующих значений частоты обратной области (TF-IDF) [8]. Значение TF-IDF, в свою очередь, используется для присвоения веса или важности слову при выполнении анализа. IDF слова «*w*» в текстовом наборе и TF-IDF слова «*w*» в данном документе *d* вычисляются с использованием приведенных ниже уравнений:

$$\mathrm{idf}(w) = \log(N / \mathrm{df}(w)),$$

$$\mathrm{Tf_idf}(w,d) = \mathrm{tf}(w,d) \times \mathrm{idf}(w),$$

где N − общее количество документов; df(w) − количество документов со словом «*w*»; tf(w,d) − частота употребления слова «*w*» в документе *d*, которая обозначает количество раз, когда «*w*» появлялось в документе *d*, деленное на общее количество слов в документе.

Классификатор на основе случайного леса. Алгоритм случайного леса объединяет несколько деревьев с помощью идеи коллективного обучения, его базовой единицей является дерево решений. В частности, каждое дерево решений является классификатором, для входной выборки N деревьев будут иметь N результатов классификации. Случайный лес определяет категорию с наибольшим количеством голосов в качестве конечного результата, одна из простейших идей объединения в пакеты. Он может эффективно предотвращать риск переобучения, уменьшать дисперсию в дереве решений, обладает хорошей устойчивостью к шуму и выбросам [9], обладая характеристиками способности обрабатывать многомерные данные с высокой точностью.

Алгоритм обучения классификатора случайного леса включает:

1. Выборки из обучающего набора отбираются случайным образом для формирования нового обучающего набора (метод пакетирования, Bootstraping).

2. Случайным образом выбираются некоторые функции из обучающего набора, чтобы сформировать новый набор функций.

3. Дерево решений обучается на основе нового обучающего набора и нового набора функций. Дерево решений обучается путем непрерывного разделения набора данных на более мелкие подмножества до тех пор, пока количество подмножеств не станет настолько малым, что оно каким-то образом будет предопределено или его нельзя будет разделить дальше.

4. Повторение шагов 1−3, чтобы обучить несколько деревьев принятия решений для формирования случайного леса.

Параметры деревьев решений в случайном лесу необходимо выбирать вручную, если этот гиперпараметр выбран неправильно, это может оказать большое влияние на производительность модели, поэтому GridSearchCV был использован авторами для выполнения задачи поиска. GridSearchCV − это вариант GridSearch, который представляет собой алгоритм, использующий перекрестную проверку для выбора наилучшего гиперпараметра.

В традиционном алгоритме GridSearch можно только выполнить обучение модели и настройку гиперпараметров на обучающем наборе, а затем оценить модель на тестовом наборе. Однако это приводит к переобучению модели, поскольку модель также будет воспринимать шум обучающего набора как достоверную информацию.

Чтобы решить эту проблему был использован метод перекрестной проверки. Перекрестная проверка делит обучающий набор на несколько подмножеств, затем каждое подмножество, в свою очередь, используется в качестве набора для проверки, в то время как остальные подмножества используются в качестве обучающего набора, многократно обучая и проверяя модель, кульминацией чего является вычисление среднего значения показателей производительности по всем наборам для проверки.

По сравнению с традиционным алгоритмом GridSearch, GridSearchCV может не только снизить риск переобучения, но и повысить стабильность и способность модели к обобщению.

Методология распознавания. После получения полного улучшенного аудио и соответствующих расшифрованных текстов для фонологического сигнала были выделены пять пространственно-временных характеристик и две демографические характеристики. Для расшифрованных текстов были извлечены три семантических признака и выполнен ввод их в модель TfidVectorizer, чтобы преобразовать текстовые данные в числовые векторы признаков, которые могут быть использованы алгоритмами машинного обучения. Затем набор функций данных был нормализован и разделен на обучающие и тестовые наборы данных в соотношении 8:2. Тестовый набор данных был использован для проверки обученной модели и получения результатов распознавания БА. На рис. 1 показана методология, используемая авторами для распознавания по изменению голоса болезни Альцгеймера.

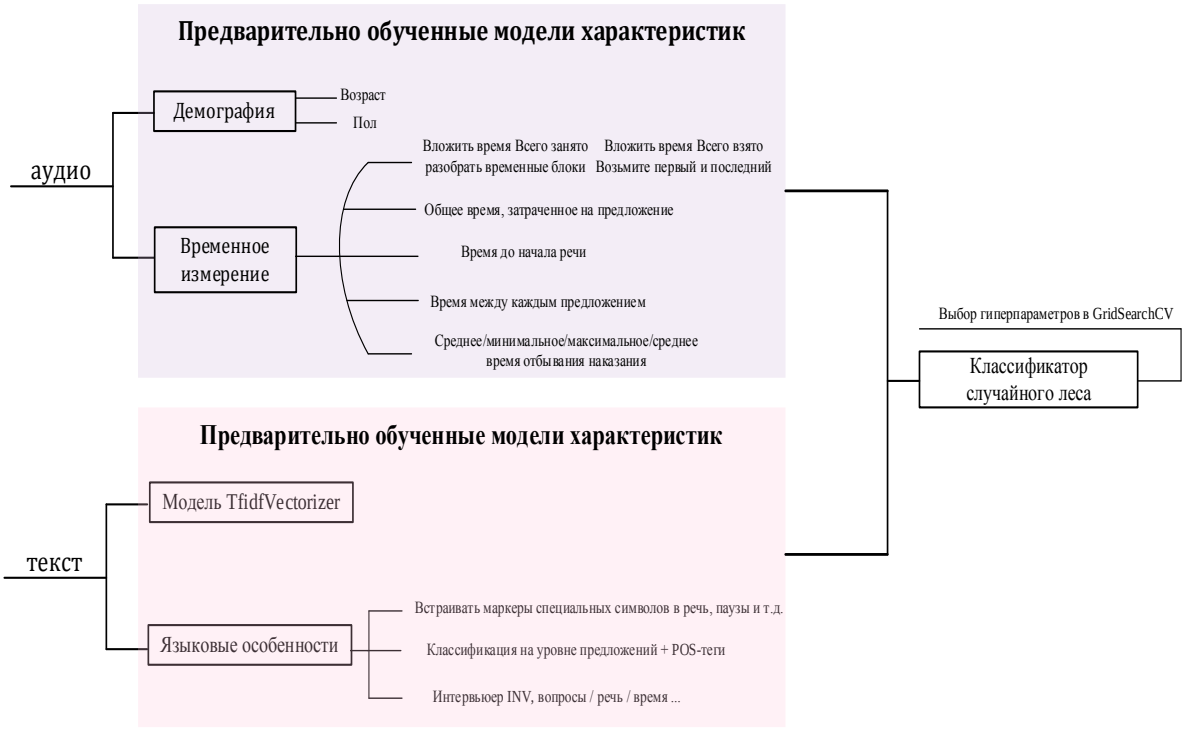


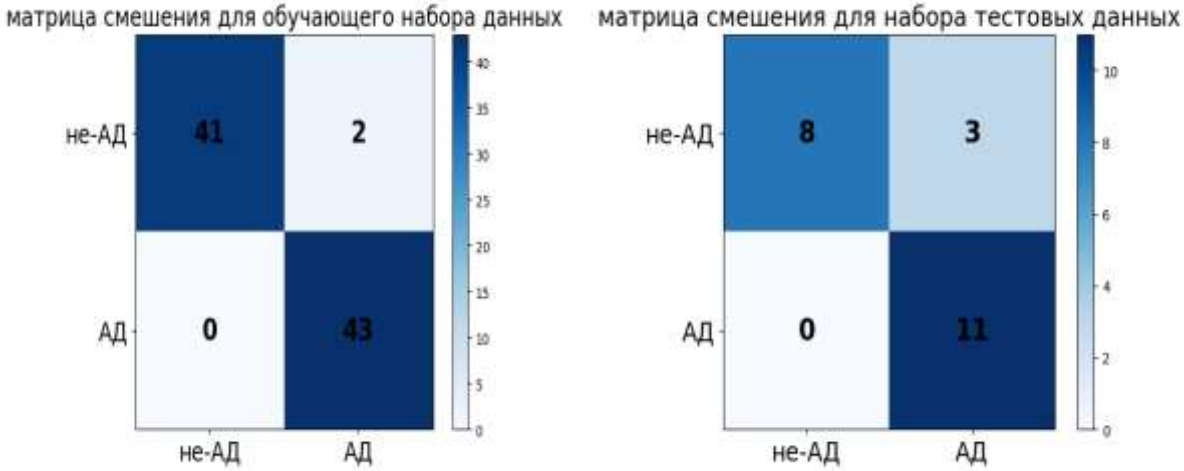
Рис. 1. Методика ИТ-диагностики БА

Результаты распознавания. Язык набора данных для этого эксперимента – английский, язык программирования – Python, один из популярных языков программирования в области машинного обучения. Он не только обладает богатыми библиотеками машинного обучения, такими как scikit-learn, TensorFlow, PyTorch, Keras и др., чтобы помочь практикам быстро создавать модели машинного обучения, но также имеет возможностями визуализации для отображения результатов. Перечень библиотек Python, использовавшихся в экспериментах:

1. Glob – предоставляет функцию сопоставления файлов, которая позволяет сопоставлять имена файлов с помощью подстановочных знаков;
2. Numpy – предоставляет функции манипулирования многомерными массивами и численных вычислений;
3. Pandas – предоставляет возможности анализа для обработки больших объемов структурированных данных;
4. Sklearn – предоставляет алгоритмы машинного обучения, предварительную обработку данных, их оценку;
5. Scipy – предоставляет функции научных расчетов и статистического анализа;
6. Torch – предоставляет платформу глубокого обучения для тензорных вычислений и моделирования нейронных сетей;
7. Transformers: предоставляет модели глубокого обучения и инструменты, связанные с обработкой естественного языка.

В эксперименте на базе обученной модели была использована матрица путаницы для оценки распознавания. Была выполнена оптимизация гиперпараметров случайного леса, используя метод GridSearchCV. После использования классификатора случайного леса матрицы смешения, составленные в соответствии с результатами, приведены на рис. 2 а и б.

.



а) б)

Рис. 2. Результаты:
а – матрица смешения обучающего набора данных; б – матрица смешения тестового набора данных

Экспериментальные результаты распознавания болезни Альцгеймера на тестовом наборе данных приведены в табл. 1.

Таблица 1

Экспериментальные результаты распознавания болезни Альцгеймера

Datasets	Accuracy	Precision	Recall	F1 Score
AD_speech	85 %	85 %	80 %	76 %

Таким образом, точность и прецизионность набора данных составили 85 %. Точность тестов в этом исследовании и существующих исследованиях по одному и тому же набору данных AD была сопоставлена в табл. 2.

Таблица 2

Сравнение с другими исследованиями

Datasets	Researchers	Research methods	Test Accuracy
Ad_speech	Ablimit A [12]	SVM	76,7 %
Ad_speech	Authors	Random forest classifier	85 %

Из табл. 2 видно, что результаты этого эксперимента превзошли классификатор SVM и позволили добиться более точной классификации. Полученная модель распознавания БА не требует клинических исследований и будет использована в сети ИВ для получения системы ИТ-диагностики.

Заключение. 1. В статье авторы представили состояние распознавания речи, актуальное при диагностике болезни Альцгеймера. Использован общедоступный набор данных изменения голоса больных Айцгеймера для машинного обучения нейронной сети. Этот набор данных был применен для обучения нейронной сети с использованием классификатора по алгоритму случайного леса с оптимизированными гиперпараметрами.

2. Применен алгоритм GridSearchCV, который делит пространство гиперпараметров на подпространства и выполняет перекрестную проверку для каждого из них, чтобы выбрать наилучшую комбинацию гиперпараметров. Набор функций данных был нормализован и разделен на обучающие и тестовые наборы данных в соотношении 8:2. Тестовый набор данных был использован для проверки результатов распознавания БА.

3. Экспериментальные результаты распознавания болезни Альцгеймера на тестовом наборе составили 85 %. Результаты эксперимента превзошли классификатор SVM в 76,7 %

и позволили добиться более точной классификации. Полученная модель распознавания БА не требует клинических исследований и будет использована в сети ИВ для получения системы ИТ-диагностики.

IT DIAGNOSTICS OF ALZHEIMER'S DISEASE BASED ON THE ANALYSIS OF VOICE INFORMATION

U.A. VISHNIAKOU, Y. CHUYE

Abstract

The purpose of the article is to use machine learning to recognize Alzheimer's disease from phonological data at an early stage of the disease. The data used in the analysis process is taken from the AdeSS2020 Challenge dataset, which contains voice information of both patients with Alzheimer's disease (for neural network training) so are patients for recognition. The approach used in this article is based on a classification model using machine learning. First, both phonological and semantic features were extracted from the voice data, then machine learning of a neural network based on these features was performed using a random forest algorithm. The GridSearchCV algorithm is also used to optimize the hyperparameters of the random forest classifier. In the process of recognizing Alzheimer's disease, the classification accuracy of the model reached 85 %.

Список литературы

1. Technology-based Tools and Services for People with Dementia and Carers / Lorenz, K. [et al.] // Mapping Technology onto the Dementia Care Pathway. Dementia (London). – 2019. – № 18 (2). – P. 725–741.
2. Speaking in Alzheimer's Disease, is that an Early Sign? Importance of Changes in Language Abilities in Alzheimer's Disease / G. Szatloczki [et al.] // Frontiers in aging neuroscience. – 2015. – Vol. 7. – P. 7–195.
3. Fraser, K. S. Linguistic Features Identify Alzheimer’s Disease in Narrative Speech / K. S. Fraser, J. A. Meltzer, F. Rudzizh // J Alzheimer Dis. – 2016. – № 49 (2). – P. 407–422.
4. Zargarbashi, S. S. Y. A Multi-Modal Feature Embedding Approach to Diagnose Alzheimer Disease from Spoken Language / S. S. Y. Zargarbashi, B. Babaali // Computer Science. – 2019. – P. 1–14.
5. Luz, F. Alzheimer’s Dementia Recognition through Spontaneous Speech / F. Luz [et al.] // Front Comput Sci. – 2021. – Vol. 3. – № 3. – A. 780169.
6. Pragmatic Aspects of Discourse Production for the Automatic Identification of Alzheimer's Disease / A. Pompili [et al.] // IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing. – 2020. – № 14 (2). – P. 261–271.
7. MacWhinney, B. The CHILDES project: Tools for analyzing talk. / B. MacWhinney // Child Language Teaching and Therapy. – 2020. – № 8 (2). – 120 p.
8. Kumar, V. A TfidfVectorizer and SVM based sentiment analysis framework for text data corpus / V. Kumar, B. Subba // National Conference on Comunications (NCC), Kharagpur, India, 2020. – P. 1–6.
9. Breiman, L. Random Forests / L. Breiman // Machine Learning. – 2001. – № 45. – P. 5–32.
10. Exploring Dementia Detection from Speech: Cross Corpus Analysis / A. Ablimit [et al.] // IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). – 2022. – P. 6472–6476.

УДК 378.1

ОСНОВНЫЕ АСПЕКТЫ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

В.М. ИВАШКО[1], Е.С. РОМАНОВА[2], Л.М. МИХИНОВА[3]

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

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

[3]*Учреждение образования «Белорусская государственная академия связи», ул. Ф.Скорины, 8/2, Минск, 220076, Беларусь*
ORCID: https://orcid.org/0009-0005-5497-00592

Поступила в редакцию 21 ноября 2023

В статье рассматриваются цели, задачи и основное содержание цифровой трансформации учреждения образования. Определены составляющие цифровой инфраструктуры учреждения образования, отличительные характеристики цифровой культуры научно-педагогического работника, основные направления цифровизации научной деятельности и элементы образовательной среды, включаемые в структуру обеспечения информационной безопасности. Приведена сравнительная характеристика содержания образовательной деятельности, процессов воспитательной и идеологической работы УВО в традиционном и digital-образовании.

Ключевые слова: цифровая трансформация, цифровизация, информационная безопасность, образовательный процесс, научная деятельность.

Введение. Влияние развития цифровой экономики на образовательный процесс в современном мире приобретает глобальный масштаб. Ведущие страны мира работают над формированием комплексного подхода к подготовке квалифицированных кадров для экономики нового времени. Особая роль в этом принадлежит системе образования, успешность которой в значительной степени зависит от профессионализма педагогов, создания условий для их профессионального развития.

Цифровая трансформация процессов в системе образования является глобальной тенденцией. Классическое образование переживает кризис, вызываемый следующими основными факторами [1]:

– отставанием знаний, получаемых обучающимися, от уровня развития технологий;

– инерционностью и невысокой адаптивностью образовательных программ к стремительно меняющимся социально-экономическим условиям;

– глобальными переменами в принципах функционирования всех сфер общества, и в том числе в образовании.

В то же время цифровые технологии активно проникают во все уровни системы образования и способствуют более эффективному вовлечению обучающихся в образовательный процесс, а также персонализации обучения посредством предоставления участникам образовательного процесса материалов, соответствующих их уровню знаний и интересам.

Исследователи отмечают значимость цифровых технологий для реализации непрерывного обучения и получения дополнительной информации вне учебных занятий. Успешная реализация широко распространенной парадигмы «обучение через всю жизнь» практически невозможна без модификации процессов, протекающих в сфере образования, на основе использования современных цифровых технологий, в частности, при организации дистанционного обучения. Кроме того, цифровая грамотность сегодня является важнейшим профессиональным навыком практически любого работника независимо от его возрастной категории.

Основная часть. В настоящее время цифровая трансформация всех областей деятельности человека предъявляет новые требования к образованию людей, которые будут участвовать в модернизации процессов во всех видах своей деятельности: на производстве, в общественной и личной жизни, создавая, внедряя и используя в повседневной практике цифровые технологии. Изменяется заказ на образование со стороны социума, рынка труда, семьи и самого обучаемого. Образование становится непрерывным, персонифицированным, мобильным, открытым [2].

Современная система образования активно проходит процесс модернизации, обусловленный цифровизацией всех сфер жизнедеятельности человека. Значимым условием профессиональной реализации выпускника образовательной организации является именно способность и готовность к использованию цифровых технологий и инструментов, наличие опыта их использования в текущих и нестандартных ситуациях [3].

Цифровая трансформация процессов в системе образования включает и такие тенденции, как возникновение спроса на глобальные цифровые дипломы и степени (в т. ч. по результатам обучения на базе работодателя), образовательные онлайн-платформы с контентом, создаваемым самими пользователями, мобильные и онлайн-курсы со смешанным учебным планом и проектно-ориентированным обучением и др. Цифровая трансформация высшего образования предполагает перестройку всех направлений деятельности с опорой на информационно-коммуникационные технологии. Изменения должны произойти в технологиях и программах обучения, методах и средствах, формах учебной деятельности, планируемых образовательных результатах, результатах оценивания.

Вместе с тем отсутствие выработанных единых подходов в части формирования цифровой образовательной среды учреждений высшего образования может привести к нерациональному расходованию бюджетных средств за счет бесконтрольно и некачественно реализуемых инициатив по внедрению информационно-коммуникационных технологий и использованию электронного образовательного контента в образовательном процессе, попыток проведения локальной цифровой трансформации процессов в системе образования без должной оценки последствий.

Еще одним проблемным вопросом является недостаток квалифицированных экспертов в области цифровизации образования, которые могут взять на себя функцию оценки и продвижения реальных инновационных подходов, а также нехватка педагогических работников, способных в полной мере реализовывать направления цифровой трансформации процессов в системе образования [1].

Объективная необходимость цифровой трансформации образовательного процесса в высшей школе обусловлена целым рядом обстоятельств. Во-первых, современные студенты имеют большую склонность к применению цифровых технологий, что будет способствовать ускорению процесса цифровизации. Во-вторых, рост конкуренции среди учреждений высшего образования (УВО), сохранение каждым из них своего конкурентного преимущества будет зависеть от своевременности внедрения цифровых технологий. В-третьих, необходима цифровая трансформация внутренних процессов учебных учреждений с целью повышения эффективности взаимодействия его подразделений.

Следует отметить, что долгое время отсутствовало единое понимание цифровой трансформации образовательного процесса. Однако теоретические исследования различных ученых делают возможным выделение нескольких вариантов его современной трактовки.

Довольно продолжительный период цифровая трансформация характеризовалась как перевод в цифровой формат или хранение в цифровом формате традиционных форм данных (в настоящее время такая процедура называется оцифровкой). Современные определения

рассматриваемой категории существенно отличаются от базового варианта и являются довольно разнообразными по своему сущностному содержанию.

Так, В. Н. Южаков и А. А. Ефремов под цифровой трансформацией образовательного сектора страны понимают качественное изменение самого образовательного процесса, а также образовательной деятельности на основе освоения прорывных информационных технологий [4].

Такие авторы, как А. Прохоров и Л. Коник отождествляют понятие цифровизации и цифровой трансформации [5]. Д. А. Антонова, Е. В. Оспенникова и Е. В. Спирин характеризуют цифровизацию образования как составляющую общего процесса – цифровой трансформации жизнедеятельности социума [6].

А. Ю. Уваров, И. В. Дворецкая определяют цифровую трансформацию образования как системное обновление совокупности образовательных результатов, организационных форм и методов учебной работы, оценок результатов образования, целью которого является подготовка обучающихся к профессиональной деятельности в цифровой среде и повышение эффективности процесса образования [7].

Следует согласиться с точкой зрения, что ключевым отличием цифровой трансформации в высшем образовании от внешне схожих явлений является то, что, прежде всего, это длительный процесс коренных качественных преобразований, который предполагает использование инновационных технологий образования во всех составляющих образовательной деятельности, с необходимостью освоения цифровых прорывных технологий всеми участниками образовательного процесса и коренных изменений в технологиях, принципах создания образовательного продукта и оказания образовательных услуг [9].

Целями цифровой трансформации процессов в системе образования являются [1]:

– подготовка обучающихся к жизни в цифровом обществе;

– подготовка системы образования к работе в условиях быстрых изменений: внедрение инновационных технологий, изменение образовательных парадигм, гибкое формирование требований и программ;

– оптимизация процессов, протекающих в системе образования;

– обеспечение качества и мобильности предоставляемых образовательных услуг на всех уровнях образования;

– повышение узнаваемости национальной системы образования и увеличение экспорта образовательных услуг.

В связи с этим основными задачами цифровой трансформации УВО являются:

– формирование цифровой инфраструктуры и единого информационно-образовательного пространства для обеспечения накопления и распространения знаний;

– формирование цифровой культуры научно-педагогических работников и обучающихся, способствующей междисциплинарному переносу знаний и сокращению «культурного разрыва» поколений. При этом учитывать «пользовательский опыт» поколения Z при формировании учебных планов и использовании методов образования, способствующих повышению мотивации в получении знаний;

– цифровая трансформация образовательного процесса в целях формирования у обучающихся компетенций, востребованных для успешной работы в условиях цифровой экономики, обеспечения конкурентоспособности выпускников на современном рынке труда;

– цифровая трансформация научно-исследовательской деятельности;

– цифровая трансформация управленческой деятельности;

– использование современных цифровых технологий в организации воспитательной и идеологической работы;

– обеспечение безопасности в цифровой образовательной среде и защита цифровой инфраструктуры;

– разработка и внедрение цифрового образовательного ресурса.

Формализация основных задач цифровой трансформации учреждения высшего образования представляет собой формальное описание основного содержания указанных выше задач.

При раскрытии сущности цифровой инфраструктуры исследователи выделяют два подхода [8], в рамках первого цифровая инфраструктура представляется как комплекс инфраструктур, отвечающих за протекание процессов, в основу которых положены цифровые

технологии; второй подход рассматривает цифровую инфраструктуру как комплекс цифровых сервисов, инструментов и технологий, а также набор созданных с их помощью продуктов, обеспечивающих сетевые, телекоммуникационные и вычислительные мощности.

В соответствии с [9] цифровая инфраструктура – комплекс технологий и построенных на их основе цифровых продуктов, функционирующий на вычислительных и телекоммуникационных мощностях (рис. 1).

Цифровая трансформация высшего образования, как и любой другой сферы, предполагает реализацию последовательных и планомерных действий, связанных с необходимостью подготовки высококвалифицированных специалистов в сфере цифровой культуры и грамотности, которые в совокупности сформируют необходимую цифровую компетентность, предполагающую информационную грамотность и умение оценивать, использовать и управлять данными, улучшать цифровой этикет и культуру, своевременно выявлять потребность в получении новых цифровых навыков [10].

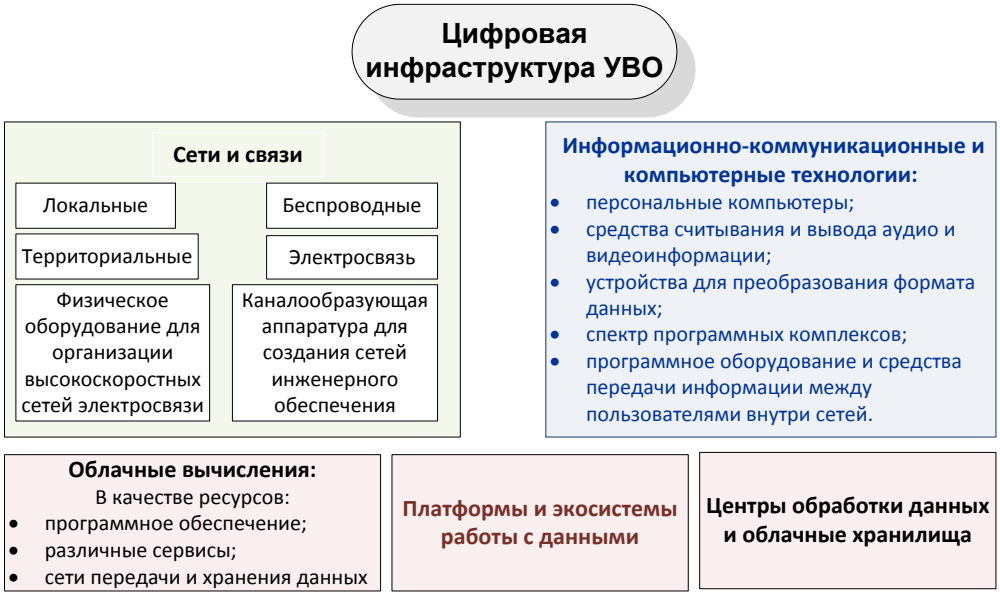


Рис. 1. Структура цифровой инфраструктуры учреждения образования

Формирование организационной цифровой культуры и цифровой культуры научно-педагогических работников (НПР) является одним из важнейших шагов на пути цифровой трансформации УВО, без которых невозможно осуществить цифровые преобразования в УВО.

Для успешной реализации организационной цифровой культуры необходимо развивать целый ряд компетенций преподавателей, в том числе их личную цифровую культуру. Под цифровой культурой преподавателя будем понимать совокупность компетенций, характеризующих понимание преподавателем современных информационно-коммуникационных технологий, их функций и способов, способность их правильного применения для обучения в цифровой среде, для взаимодействия с обществом и решения цифровых задач в своей профессиональной деятельности [11].

На основании вышеуказанных положений и с учетом выполненных ранее исследований [12] и [13] можно сформировать отличительные характеристики цифровой культуры научно-педагогического работника. К ним относятся:

– общепользовательская цифровая компетентность;
– общепедагогическая цифровая компетентность;
– коллаборация на базе цифровых технологий;
– цифровая этика;
– цифровая мотивация и саморегуляция.

Традиционно образовательную (учебную) деятельность в высшей школе образуют следующие процессы:

– разработка учебно-программной документации – процесс создания модели образовательного процесса профессиональной подготовки конкурентоспособного выпускника конкретной области знаний, науки и техники;

– обучение – целенаправленный процесс взаимодействия педагогов и обучаемых, в результате которого формируются знания, умения, навыки, опыт деятельности и личностные качества;

– контроль знаний – процесс сопоставления достигнутых результатов обучения с заданными в целях обеспечения качества подготовки студентов.

Основная цель цифрового развития системы высшего образования в Республике Беларусь видится в создании условий для успешной интеграции в единое информационное пространство, что позволит всем участникам образовательного процесса получить наиболее актуальную информацию и использовать новейшие информационные технологии для успешного освоения выбранной специальности и формирования профессиональных компетенций, котирующихся на рынке труда.

Сравнительная характеристика содержания процессов образовательной деятельности УВО в традиционном и digital-образовании представлена в табл. 1.

Таблица 1

Сравнительная характеристика содержания процессов образовательной деятельности УВО в традиционном и digital-образовании

Процесс	Традиционное образование	Digital-образование
Разработка учебно-программной документации	Содержание, виды, порядок разработки и согласования учебно-программной документации определяются требованиями законодательства и образовательными государственными стандартами	Учебные планы и программы пересматриваются или интерпретируются (в зависимости от степени автономии, которой обладает организация в отношении таких изменений) и регулярно обновляются, чтобы использовать потенциал цифровых технологий обучения и цифрового контента для модернизации методов преподавания, обучения и оценки и улучшения охвата результатов обучения
Обучение		
Образовательные технологии	Преимущественно контактные, целенаправленно управляемые, построенные по дисциплинарно-предметному принципу: лекции, практические и семинарские занятия, лабораторные работы	Используются образовательные технологии, реализуемые в основном с применением информационно-телекоммуникационных сетей при опосредованном (на расстоянии) взаимодействии обучающихся и педагогических работников: вебинары, электронные курсы, виртуальная реальность, обучающие игры
Методы обучения	Традиционные и активные методы обучения, базирующиеся, преимущественно, на передаче обучаемым готовой информации и формирования у них требуемых сегодня профессиональных и личностных компетенций	Предоставление студентам и педагогам права и физической возможности широко использовать цифровые инструменты и в повседневной учебной работе: проектное обучение, проблемное обучение, метод кейсов, перевернутое обучение и т. д.
Формы обучения	Преобладают очное и заочное групповые обучения, включающие элементы самостоятельной работы. Начинают формироваться дистанционное и индивидуальное обучения	Доля аудиторных форм обучения снижается, преобладает самостоятельное, личностноориентированное, дистанционное обучение

Продолжение таблицы 1

Процесс	Традиционное образование	Digital-образование
Контроль знаний	Преобладают контрольные и обучающие формы контроля знаний (зачеты, экзамены, рейтинговая оценка, коллоквиумы)	Преобладают корректирующие формы, а также формы и методы, которые увеличивают его объективность и способствуют повышению эффективности обучения (банки тестовых заданий и проведение электронного тестирования (зачеты, экзамены) в форме независимого контроля знаний)

Цифровая трансформация научной деятельности предполагает повышение эффективности всех входящих в нее видов деятельности за счет их цифровизации, систематизации и сведения в единую базу данных результатов научной деятельности, построения единой сервисной платформы науки как основы для создания и развития единой экосистемы сервисов по проведению исследований и разработок.

Основные направления цифровизации научной деятельности УВО представлены на рис. 2.

Воспитательная и идеологическая работа с молодежью в условиях цифровой трансформации образования требует перехода от традиционных методик к использованию информационных технологий, приобщения педагогических работников и обучающихся к информационному пространству, создания качественных информационных ресурсов по проблемам воспитания.

Рис. 2. Основные направления цифровизации научной деятельности учреждения высшего образования

Цифровые технологии становятся универсальным инструментом образовательно-воспитательного процесса, использование которого позволяет педагогам решать организационно-педагогические и методические задачи на качественно высшем уровне (табл. 2).

Таблица 2

Сравнительная характеристика содержания процессов идеологической и воспитательной деятельности УВО в традиционном и digital-образовании

Процесс	Традиционное образование	Digital-образование
Формирование нормативной базы, регламентирующей воспитательную работу	Формирование национальных проектов, инициируемых Министерством образования	Формирование открытого доступа к различным проектам, инициируемым учреждениями образования
Разработка программной документации	Разработка учебных программ факультативных занятий воспитательной направленности осуществляется на бумажном носителе	Учебные программы факультативных занятий воспитательной направленности разрабатываются в электронных версиях и размещаются на национальном образовательном портале
Виды деятельности		
Патриотическое воспитание	Проведение кураторских часов, семинаров на патриотические темы, встреч с интересными людьми.	Разработка и обеспечение функционирования интерактивной онлайн-платформы по организации патриотического воспитания молодежи
Информационно-пропагандистская работа	Использование информационных стендов, газет, журналов, сайтов ВУЗов для информационно-пропагандистской работы	Использование социальных сетей и интернет-каналов (Youtube-канала, Telegram-каналов) для информационно-пропагандистской работы
Творческий и научный потенциал молодежи	Традиционные и активные системы стимулирования и поддержки одаренной и талантливой молодежи, молодежных инициатив, оптимизация условий для реализации ее творческого потенциала путем получения грантов в сфере культуры и искусства	Развитие системы льготного кредитования и микрокредитования для поддержки и реализации молодежных бизнес-проектов
Волонтерская деятельность	Проведение информационно-разъяснительной работы по продвижению и популяризации волонтерских ценностей, поддержке на республиканском и областных уровнях общественных объединений, занимающихся реализацией программ для добровольцев и волонтеров	Создание и развитие Telegram-канала волонтерского движения
Проведение и участие в торжественно-праздничных мероприятиях	Участие в праздничных мероприятиях организуется в основном на собственной базе, на городском, реже национальном уровне. Могут возникать трудности с финансированием.	Использование интерактивных платформ для участия в мероприятия. Отсутствие географических ограничений для участников. Возможность отслеживания реакции зрителей на проводимые мероприятия с помощью аналитических метрик.
Организация досуга студентов во внеучебное время	Участие в спортивных мероприятиях, художественном и техническом творчестве	Использование информационных технологий для разработки плана действий (тайм-лайны), визуализации данных (ментальные карты, интеллект-карты), инфографики (интерактивные плакаты), облако тегов (слов), виртуальные доски/онлайн-стенгазеты и др.

Цифровая трансформация управленческой деятельности УВО включает:

– обеспечение аналитики хода и результатов образовательного процесса в УВО на основе технологий искусственного интеллекта и нейронных сетей;

– прогнозирование успеваемости студентов, потребности экономики в обучении молодых специалистов (в разрезе каждой специальности, по которой осуществляется прием в УВО);

– применение облачных технологий для более эффективной организации сетевых ресурсов УВО и объединения их в единую образовательную сеть;

– совершенствование и интеграцию в единую систему различных баз и банков данных, используемых в УВО;

– формирование информационно-образовательной среды, применение современных средств коммуникации (включая социальные сети) для продвижения образовательных услуг УВО Беларуси, в том числе и на мировом рынке, постепенную замену бумажного документооборота электронным.

Информационная безопасность цифровой инфраструктуры и образовательной среды предполагает наличие собственной интегрированной подсистемы безопасности, которая включает нормативно-правовую базу, разработанную собственную политику обеспечения безопасности учреждения и построенных на ее основе планов и процедур безопасной работы, технические средства защиты информации.

Основные элементы образовательной среды, включаемые в структуру обеспечения информационной безопасности учреждения образования, представлены на рис. 3.

Цифровая трансформация ВУЗа дает возможность всем участникам образовательного процесса получить наиболее актуальную информацию и использовать новейшие информационные технологии для успешного освоения выбранной специальности и формирования профессиональных компетенций, котирующихся на рынке труда. Для достижения обозначенной цели современный педагог должен с высокой эффективностью использовать все имеющиеся средства информационной образовательной среды (ИОС), одной из составляющих которой является комплекс электронных образовательных ресурсов (ЭОР).

ЭОР – это наиболее общий термин, объединяющий средства обучения, разработанные и реализуемые на базе компьютерных технологий. Цифровые образовательные ресурсы (ЦОР) – частный случай ЭОР – образовательные ресурсы, созданные и функционирующие на базе цифровых технологий.

Рис. 3. Элементы образовательной среды, включаемые в структуру обеспечения информационной безопасности учреждения образования

Заключение. Современная система образования активно проходит процесс модернизации, обусловленный цифровизацией всех сфер жизнедеятельности человека. Внедрение информационно-коммуникационных технологий в системе образования позволяет трансформировать процесс подготовки обучающихся, внедрять новые формы, методы, средства обучения, технологии и программы. Цифровая трансформация процессов в системе образования включает и такие тенденции, как возникновение спроса на образовательные онлайн-платформы

с контентом, мобильные и онлайн-курсы со смешанным учебным планом и проектно-ориентированным обучением и др. Важным аспектом при этом является уровень подготовки преподавателя, наличия у него цифровой культуры.

Создание единого информационно-образовательного пространства на основе развитой цифровой инфраструктуры учреждения образования, разработка и наличие цифровых образовательных ресурсов, наличие достаточного количества специалистов, обладающих цифровой культурой являются непременными условиями цифровой трансформации учреждения высшего образования.

THE MAIN ASPECTS OF THE DIGITAL TRANSFORMATION OF HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS

V.M. IVASHKO, E.S. ROMANOVA, L.M. MIKHINOVA

Abstract

The article discusses the goals, objectives and main content of the digital transformation of an educational institution. The components of the digital infrastructure of an educational institution, the distinctive characteristics of the digital culture of a scientific and pedagogical worker, the main directions of digitalization of scientific activity and the elements of the educational environment included in the structure of information security are determined. The comparative characteristics of the content of educational activities, the processes of educational and ideological work of the higher education institution in traditional and digital education are given.

Список литературы

1. Концепция цифровой трансформации процессов в системе образования Республики Беларусь на 2019–2025 годы. – Минск. – 2019. – 18 с.

2. О Государственной программе «Цифровое развитие Беларуси» на 2021–2025 годы : постановление Совета Министров Республики Беларусь, 2 февр. 2021 г. № 66 // ЭТАЛОН. Законодательство Республики Беларусь / Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. – Минск, 2021.

3. О Концепции развития системы образования Республики Беларусь до 2030 года : постановление Совета Министров Республики Беларусь, 30 нояб. 2021 г. № 683 // ЭТАЛОН. Законодательство Республики Беларусь / Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. – Минск, 2021.

4. Южаков, В. Н. Правовые и организационные барьеры для цифровизации образования в Российской Федерации / В. Н. Южаков, А. А. Ефремов // Российское право. Образование, практика, наука. – 2018. – № 6. – С. 18–24.

5. Прохоров, А Цифровая трансформация. Анализ, тренды, мировой опыт. Издание второе, исправленное и дополненное / А. Прохоров, Л. Коник. – М. : ООО «КомНьюс Груп», 2019. – 368 с.

6. Антонова, Д. А. Цифровая трансформация системы образования. Проектирование ресурсов для современной цифровой учебной среды как одно из ее основных направлений / Д. А. Антонова, Е. В. Оспенникова, Е. В. Спирин // Вестник Пермского государственного гуманитарно-педагогического университета. – 2018. – № 14. – С. 5–37.

7. Трудности и перспективы цифровой трансформации образования / А. Ю. Уваров [и др.] ; под ред. А. Ю. Уварова, И. Д. Фрумина. – М. : Изд. дом Высшей школы экономики, 2019. – 343 с.

8. Хайруллина, А. Р. Цифровая инфраструктура как среда принятия управленческих решений в малом и среднем предпринимательстве / А. Р. Хайруллина // Экономика, предпринимательство и право. – 2021. – Том 11, № 5. – С. 1151–1166.

9. СТБ 2583-2020 Цифровая трансформация. Термины и определения. – Минск : НИРУП «ИППС», 2020. – 16 с.

10. Глузман, А. В. Модель формирования и развития цифровой трансформации ВУЗа / А. В. Глузман, Н. В. Горбунова, Р. Р. Тимиргалеева // Гуманитарные науки. – 2021. – № 3. – С. 10–16.

11. Глузман, А. В. Модель формирования и развития цифровой культуры вуза / А. В. Глузман, Р. Р. Тимиргалеева, М. В. Переверзев. // Гуманитарные науки. – 2021. – № 2. – С. 51–56.

12. Научно-методическое сопровождение реализации цифровой трансформации предприятия (организации) : отчет о НИР (промеж.) / УО Белорус. гос. акад. связи ; рук. В. М. Ивашко. – Минск, 2022. – 240 с.

13. Леонтьева, А. В. Цифровая культура современного педагога как ресурс профессиональной деятельности в условиях цифровой трансформации образовательного пространства / А. В. Леонтьева, С. А. Бибалова, Ф. Р. Хатит // Вестник Майкопского государственного технологического университета. – 2022. – Том 14, № 4. – С. 127–136.

УДК 004.93.1

АНАЛИЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БИОМЕТРИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ И ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМЫ РАСПОЗНАВАНИЯ ПРИ ОРГАНИЗАЦИИ ФИЗИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ

И.А. ОВЧИННИКОВА[1], О.О. ШАМАНОВА[2]

[1]*Учреждение образования «Смоленский колледж телекоммуникаций (филиал) СПбГУТ», ул. Коммунистическая, 21, Смоленск, 214000, Россия*
ORCID: https://orcid.org/0009-0002-3022-6388

[2]*Учреждение образования «Смоленский колледж телекоммуникаций (филиал) СПбГУТ», ул. Коммунистическая, 21, Смоленск, 214000, Россия*
ORCID: https://orcid.org/0009-0002-1966-6737

Поступила в редакцию 10 октября 2023

Представлены результаты исследований использования биометрических технологий при организации физической защиты информации и повышения надежности систем распознавания. Показано, что реализация систем с надежными методами распознавания объектов сводится к задаче «связанной идентификации». Предложенный метод связанной идентификации показывает высокую надежность при работе с базой биометрических данных от полутора тысяч и более объектов идентификации и эффективен для решения проблемы, когда надежность алгоритмов идентификации снижается при увеличении количества зарегистрированных пользователей.

Ключевые слова: технологий биометрической идентификации, метод связанной идентификации, факторы надежности, ошибки распознавания, алгоритмы идентификации.

Введение. Биометрические данные человека – это уникальные физиологические и/или поведенческие данные человека, которые могут быть использованы для его идентификации. Так как физиологические данные человека уникальны и не могут быть утеряны или подделаны, биометрия используется чаще всего в системах контроля доступа в тех сферах, где безопасность особенно важна. Это упрощает многие операции – от совершения покупок до регистрации на рейс. Например, в России с помощью биометрии можно: дистанционно пройти регистрацию в банке; открыть счет или вклад, оформить кредит; расплатиться в магазинах, кафе; снять деньги в банкомате. Поэтому исследования, позволяющие организовать физическую защиту информации с применением биометрических технологий, являются актуальными в различных сферах деятельности [1, 2].

Основная часть. Вопрос защиты информации и объектов информатизации в настоящее время стоит достаточно остро. Для эффективного решения данного вопроса необходимо грамотное сочетание двух направлений реализации: физическая защита объектов и допуск к информации определенных сотрудников.

Для реализации физической защиты объектов необходимо выполнить идентификацию и аутентификацию сотрудника, проверить его на права доступа к объекту и зафиксировать данное действие в специальном журнале. Применяемые сейчас технологии идентификации, а это в основном использование различных документов определения личности и различные пароли, коды доступа не обеспечивают требуемую надежность, в связи с возможностью их

подделки и кражи, что давно не соответствует современным требованиям к защите информации и объектов информатизации.

Поэтому необходимо для идентификации личности применять комплексно биометрические технологии для организации допуска к объектам защиты информации и, если необходимо, для допуска к самой информации. Биометрические технологии при идентификации дают решение следующих факторов надежности:

1) не зависит от пользователя;
2) обеспечивает простоту идентификации;
3) дает возможность применения различных сканеров, совмещенных с ПК;
4) лишает возможности передачи идентификационных данных злоумышленникам.

В настоящее время разработано и в разной степени используются в различных областях множество технологий биометрической идентификации [3, 4], а именно:

1) видеообраз лица 2D и 3D;
2) термограмма лица;
3) отпечаток пальца;
4) геометрия ладони;
5) рисунок вен;
6) радужка оболочки глаза;
7) сетчатка глаза;
8) подпись;
9) клавиатурный подчерк;
10) динамика письма;
11) голос;
12) рисунок губ;
13) ушная раковина;
14) походка;
15) запах;
16) ДНК.

Каждая из них обладает своими особенностями, достоинствами и эффективностью применения.

Для определения необходимости использования каждой из биометрической технологии идентификации необходимо исходить из конкретных условий организации физической защиты объектов и степени защиты информации. Поэтому необходимо учитывать следующие факторы:

1) время идентификации – время для корректного сбора биометрии и ее распознавания;
2) широта охвата субъекта идентификации – пропускная способность системы биометрии при сканировании разных участков тела разная, например, пропускная способность системы биометрии в режиме онлайн выше, чем в режиме офлайн при сканировании лица;
3) способ сбора биоданных – контактные и бесконтактные способы сбора данных, в настоящее время более точными считаются бесконтактные способы;
4) устойчивость к помехам – низкие показатели коэффициента ложного отклонения и вероятности ошибки в определении совпадений входным образцом и шаблоном из базы, а также низкое качество представленных данных;
5) необходимая инфраструктура для хранения биометрических данных и различные сенсоры – различные средства для хранения биометрических шаблонов, сканеры и другие интеллектуальные устройства для сбора и оцифровки биометрических данных;
6) надежность системы биометрии – характеризуется низким значением всех метрик качества распознавания и показателей обеспечения эксплуатации надежности;
7) контекст приложения – место и особенности использования системы биометрии;
8) стоимость реализации системы биометрии.

Также, для оценки эффективности применения биометрических технологий используют следующие основные критерии:

1) безопасность;
2) уникальность;
3) универсальность;
4) постоянство;

5) удобство сбора;
6) производительность;
7) приемлемость;
8) обход;
9) устойчивость к фальсификациям.

Биометрическая идентификация преследует цель – создание такой системы обеспечения информационной безопасности, которая бы редко отказывала в допуске на объекты определенным категориям сотрудников и полностью исключила бы несанкционированный доступ к информации.

Так, проведя анализ использования различных биометрических технологий, по совокупности перечисленных критериев можно сделать вывод, что для объектов с максимальной надежностью идентификации необходимо использовать радужную оболочку и отпечаток пальца или определение запаха, которые дают высокие показатели идентификации. По технологии определения запаха очень тяжело организовывает собираемость шаблонов в матрицу показателей. Для объектов с большой проходимостью оптимальным будет использование отпечатка пальца и голоса. Для объектов с небольшим количеством сотрудников и без их участия в идентификации оптимально использование распознавания видеообраза лица и походки.

Применение комплексно нескольких технологий биометрической идентификации при построении и организации системы защиты объектов информатизации в несколько раз повышает надежность защиты самой информации, и может полностью исключить несанкционированный доступ к объектам информатизации [5].

Для повышения надежности распознавания объектов информатизации выделяют три типа смешивания технологий. Такое объединение может считаться выгодным, если выбранная стратегия не выходит за рамки следующих ограничений:

1) при объединении технологий по правилам дизъюнкции вероятность ошибки второго рода слабой технологии должна быть в два раза меньше, чем норма равной ошибки совершенной технологии;

2) при объединении технологий по правилам конъюнкции вероятность ошибки второго рода слабой технологии должна быть в два раза меньше, чем норма равной ошибки совершенной технологии.

Проведенный анализ разработанных и апробированных методов объединения биометрических технологий на уровне сходства показал, что смешивание технологий двумерного и трехмерного распознавания лица в режиме регистрации приводит к уменьшению ошибки первого рода в три раза по сравнению с технологией двумерного распознавания при фиксированной ошибке второго рода.

Ряд экспериментов, проведенных РАН, также подтверждает, что объединение технологий для распознавания лица и отпечатков пальцев в режиме проверки и подтверждения информации снижает норму уровня ошибки, при котором ошибки первого и второго рода равны на один процент, что приводит к уменьшению ошибки первого рода до пятидесяти процентов, в зависимости о выбранной стратегии объединения [6].

Самая популярная технология объединения биометрических данных – это сочетание распознавания по лицу и по голосу. Данная система реализует второй уровень объединения. Для разработки такой системы применяются следующие требования:

1) возможность идентификации в режиме онлайн в базе более 1000 объектов идентификации;

2) применение стандартных вычислительных средств стандартного ПК;

3) отсутствие иных предметов идентификации;

4) эргономичность для оператора и пользователя;

5) отсутствие непосредственного физического контакта объекта идентификации с системой;

6) возможность масштабирования системы;

7) уменьшение роста базы данных на точность распознавания.

Задача распознавания сводится к сравнению один к одному или один ко многим.

Для этого РАН был введен термин «связанная идентификация» [6]. Связанная идентификация – сопоставление предоставленного шаблона на предмет его сходства с каким-либо эталоном из сравнительно небольшого списка вероятных эталонов, связанных с проведенными ранее операциями распознавания. Связанное подмножество базы эталонов формируется в результате работы алгоритмов распознавания голоса. Работа такой системы основана на последовательности применения следующих процедур:

1) первичного распознавания по голосу с заниженным порогом отбраковки чужих шаблонов;

2) последующего комбинированного распознавания по лицу и голосу.

Речевые данные сводят задачу идентификации к задаче связанной идентификации, что существенно сокращает число гипотез распознавания и объем вычислений в базе данных. Совместное решение распознавания при реализации разными алгоритмами повышает надежность и устойчивость системы при различных условиях работы. Такое комбинирование при решении задачи распознавания речи, голоса и изображения лица призвано устранять существенные недостатки технологии идентификации.

Комплекс системы распознавания человека, как объекта идентификации, состоит из аппаратных средств и программного обеспечения, которые позволяют производить видеозахват изображения, запись аудиоданных в режиме стерео, выдавать команды для диалога с пользователем и обрабатывать данные всех информационных каналов для принятия окончательного решения по распознаванию объекта. Два канала аудио решают задачу подавления шумов речевого сигнала.

Стереоскопическое видео дает возможность надежно обнаруживать на любом фоне лицо человека как трехмерный объект и обеспечивает дополнительную защиту от попыток взлома с помощью фотографии или видео.

Работа схемы идентификации состоит в следующем: обнаружение присутствия объекта → интенсивный поиск лица → запрос речевых данных → распознавание речи → составление списка связанных кандидатов → отслеживание лица → совместное расположение черт лица и голоса.

Общий сценарий заключается в следующем: запуск и инициализация → переход в рабочий режим – идентификацию → активация процедур сканирования видео и аудиоданных объекта → распознавание лица и голоса. В зависимости от настроек системы условием начала сканирования может быть обнаружение одного или нескольких признаков:

1) обнаружение трехмерного объекта подходящих размеров;

2) обнаружение сходного лица объекта на двумерных изображениях;

3) обнаружение голоса.

Если нет жесткого условия отсутствия физического контакта пользователя и системы, возможно подключение клавиатуры и запуск сканирования по нажатию клавиши. Также систему можно дополнить ПИН-кодом, вводимым с клавиатуры, и перейти от задачи идентификации к распознаванию.

В цикле распознавания используются сложные, но более надежные и устойчивые методы поиска лица на изображении и детектировании голоса. Далее полученные результаты применяются для выделения черт лица, речевых компонент и построения шаблонов по биометрической информации.

Сочетание нескольких быстрых методов для обнаружения объекта с медленными, но надежными методами обработки полученных данных, дает системе значительную гибкость.

В случае успешной регистрации обоих типов биометрических данных выполняется двухступенчатая процедура идентификации. В режиме идентификации объект, подходящий к месту контроля, должен выполнить следующие действия:

1) встать прямо перед камерой и смотреть строго в объектив;

2) произнести вслух ключевую фразу, состоящую из пяти цифр.

Последовательность из пяти цифр уникальна для каждого человека, которая позволяет производить распознавание не только по характеристикам голоса, но и по содержанию фразы.

Алгоритмы распознавания, используемые системой, делятся на алгоритмы подсистемы обработки и распознавания аудио и видеоданных, алгоритмы подсистемы интегрированного принятия совместного решения [7].

Первая подсистема включает модули детектора речи, распознавания речи и распознавания голоса, вторая – модули обнаружения изменения сцены и трехмерных объектов заданной геометрии, поиска лица, уточнения положения его частей на изображении, и распознавания лица.

Распознавание речи в системе реализуется на базе небольшого конечного словаря команд (цифры на русском и английском языках). Распознавание речи производится, в том числе с помощью марковской модели и трехмерных самоорганизующихся карт для кепстральных коэффициентов.

Распознавание голоса реализуется посредством оценки его уникальных характеристик во время произнесения ключевой фразы и сравнения ее с характеристиками голоса эталона и учетом произнесенной фразы.

Распознавание лица реализуется на основе разложения изображений лица и его черт в подпространствах главных компонент. В системе использованы основные усовершенствования данного подхода: дискриминантный анализ Фишера и сканирование локальных окрестностей.

Исследования показали, что в подсистеме интегрированного принятия решения ошибки распознавания по голосу и изображению лица слабо коррелируют между собой. Поэтому разработано совместное решающее правило, позволяющее улучшить результаты распознавания. Разработанное решающее правило построено как линейный классификатор, разделяющий сравнение на два класса:

1) сравнение эталонов одного человека;

2) сравнение эталонов разных людей.

Поскольку основные показатели качества систем контроля доступа – ошибка первого рода (ошибочный отказ в доступе зарегистрированному пользователю) и ошибка второго рода (ложная идентификация – пропуск нарушителя), то классификатор строится так, чтобы минимизировать относительное количество ошибок первого рода при заданном фиксированном относительном уровне ошибок второго рода, равным 0,003 на обучающей выборке.

Для обучения и тестирования алгоритмов распознавания и выбора правила необходима масштабная экспериментальная тестовая база данных – синхронные записи стерео, видео изображений и стереофонического звука. Для разработки такой подсистемы необходимо учесть следующие особенности:

1)операции по детектированию и распознаванию лица должны проводиться одновременно с операциями по распознаванию речи и голоса;

2) распознавание должно быть устойчивым по отношению к быстрым изменениям лица при речевых движениях и мимике;

3) положение лица относительно камер может немного изменяться, что может влиять на его изображение.

Предложенный метод связанной идентификации показывает достаточно высокую надежность при работе с базой биометрических данных не менее полутора тысяч объектов идентификации. Применение этого метода позволяет снизить примерно в три раза уровень ошибок первого рода при фиксированном уровне ошибок второго рода. В качестве базовых алгоритмов распознавания по каждому отдельному признаку – лицу, голосу, речи используются известные алгоритмы. Данный метод связанной идентификации является также эффективным средством для решения проблемы, когда надежность алгоритмов идентификации снижается при увеличении количества зарегистрированных пользователей.

Заключение. Представлены результаты использования биометрических технологий при организации физической защиты информации. Проведен анализ факторов и критериев надежности биометрических систем идентификации объектов при организации системы защиты биометрических данных.

Показано, что метод связанной идентификации дает достаточно высокую надежность при работе с базой биометрических данных от полутора тысяч объектов идентификации и позволяет снизить примерно в три раза уровень ошибок первого рода при фиксированном уровне ошибок второго рода.

Проведенные исследования представляют научно-техническую основу для обоснования и разработки биометрических систем с комбинированным алгоритмом распознавания объектов, с базой данных более чем полутора тысяч объектов идентификации.

ANALYSIS OF THE USE OF BIOMETRIC TECHNOLOGIES AND IMPROVEMENT OF THE RELIABILITY OF THE RECOGNITION SYSTEM IN THE ORGANIZATION OF PHYSICAL PROTECTION OF INFORMATION

I.A. OVCHINNIKOVA, O.O. SHAMANOVA

Abstract

The results of research on the use of biometric technologies in the organization of physical protection of information and improving the reliability of recognition systems are presented. It is shown that the implementation of systems with reliable methods of object recognition is reduced to the task of «linked identification». The proposed method of linked identification shows high reliability when working with a database of biometric data from one and a half thousand or more identification objects and is effective for solving the problem when the reliability of identification algorithms decreases with an increase in the number of registered users.

Список литературы

1. Dessimoz, D. Multimodal Diometrics for Identity Documents / Dessimoz D. [et al.] // Research Report, PFS 314-08.05. UNIL, June, 2006. – 156 p.

2. Sinitsyn, I. Development of metrological andbiometric technologies and systems / I. Sinitsyn, O. Ushmaev // Proceedings 9th Conference (International) in Pattern Recognition and Image Analysis : New Information Technologies. – Нижний Новгород, 2008. – С. 169–172.

3. Ворона, В. А. Биометрическая идентификация личности / В. А. Ворона. – М. : Горячая линия-Телеком, 2021. – 228 с.

4. НОУ ИНТУИТ. Биометрические системы информационной безопасности на основе Intel Perceptual Computing SDK. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://intuit.ru/studies/courses/10620/1104/lecture/24041. – Дата доступа : 28.09.2023.

5. Технологии и методы биометрической идентификации. Сравнительный анализ основных методов биометрической идентификации. 2023. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.techportal.ru/security/biometrics/tekhnologii-biometricheskoy-identifikatsii/. – Дата доступа : 28.09.2023.

6. Мурынин, А. Мультимодальная биометрия – перспективное решение. Объединение алгоритмов для повышения надежности распознавания человека. Типовые решения систем безопасности / А. Мурынин [и др.] – ВЦ РАН, 2018. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://sio.su/down_017_41_def.aspx. – Дата доступа : 28.09.2023.

7. Биометрический выбор модальности. 2018 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://coderlessons.com/tutorials/akademicheskii/uchites-biometrii/biometricheskii-vybor-modalnosti. – Дата доступа : 28.09.2023.

Отраслевая лаборатория перспективных информационно-коммуникационных технологий учреждения образования «Белорусская государственная академия связи»

Соответствует требованиям ГОСТ ISO/IEC 17025:2017, ITD. Выполняет калибровку и поверку средств измерений в соответствии с областью аккредитации

Оказываемые услуги:

Вид работ	Средство измерения	Измеряемая величина
Калибровка	оптические рефлектометры, приборы оптические многофункциональные	оптическая длина
		ослабление оптического излучения
	измерители мощности оптического излучения, оптические тестеры, приборы оптические многофункциональные	средняя мощность оптического излучения
		относительные уровни средней мощности оптического излучения
Поверка	тестеры оптические (измерители и источники оптического излучения), приборы оптические многофункциональные, оптические рефлектометры	соответствие средств измерений метрологическим характеристикам

Контактные данные:

220076, г. Минск, ул. Франциска Скорины, 8/2, ком. 322.
Заведующий лабораторией – Жданович Сергей Вячеславович, кандидат технических наук, доцент.
тел.: +375 (29) 351 23 45
E-mail: bsac@bsac.by