



«Прошло *более полувека* с того далекого времени, когда был образован первый и единственный на просторах от Урала до Тихого океана специализированный вуз, перед которым ставилась задача подготовки инженеров для бурно развивавшейся радиоэлектронной промышленности страны.

Томский институт радиоэлектроники и электронной техники за эти годы превратился в один из ведущих технических университетов России.

История университета — это история его кадров. ... Десятки, сотни замечательных, умных и красивых людей проходят перед нами. Это они создали Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, это их способности, энергия и самоотверженный труд воплощены в том, что кадровую основу радиоэлектронной промышленности Сибири, Дальнего Востока, Средней Азии образовали именно выпускники ТУСУРа.

Немного осталось тех, кто в 1962 году принял эстафету радиотехнического факультета Томского политехнического института. Пришли новые люди с новыми ценностями и устремлениями. С трудом вспоминаются многие имена из тех, кто в свое время внес существенный вклад в развитие университета. Иногда мы забываем, что наши сегодняшние успехи основаны на достижениях предыдущих поколений.»

*«Кто есть кто в истории ТУСУРа» 2009 г.  
(иллюстрированный очерк о роли личностей в истории первого и единственного вуза радиоэлектронного профиля на территории Азиатской части России и СССР)  
(составители Подлипенский В.В., Шарыгин Г.С.  
под общей редакцией Г.С. Шарыгина)  
(заменив в ней буквально одно слово)*



11—13 октября

| РТС | ТУСУР

# ШАРЫГИНСКИЕ ЧТЕНИЯ 2023

**ПЯТАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ  
НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ВЕДУЩИХ  
НАУЧНЫХ ШКОЛ В ОБЛАСТИ РАДИОЛОКАЦИИ,  
РАДИОНАВИГАЦИИ И РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ  
СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ**

ШАРЫГИНСКИЕ ЧТЕНИЯ-2023. ПЯТАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Томский государственный университет систем управления  
и радиоэлектроники

## **ШАРЫГИНСКИЕ ЧТЕНИЯ**

---

### **ПЯТАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ВЕДУЩИХ НАУЧНЫХ ШКОЛ В ОБЛАСТИ РАДИОЛОКАЦИИ, РАДИОНАВИГАЦИИ И РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ**

**Томск, 11 – 13 октября 2023 г.**

**Материалы конференции**

Томск  
Издательство ТУСУРа  
2023

ББК 32.84  
Ш269

### Организационный комитет

Рулевский В.М. – председатель организационного комитета, ректор ТУСУРа,  
д-р техн. наук, доцент;  
Лоцилов А.Г. – заместитель председателя организационного комитета,  
проректор по научной работе и инновациям ТУСУРа, зав. каф. КУДР,  
канд. техн. наук, доцент;  
Медовник А.В. – начальник научного управления ТУСУРа, доцент каф. физики,  
канд. техн. наук;  
Захаров Ф.Н. – ст. науч. сотр., доцент каф. РТС ТУСУРа, канд. техн. наук;  
Коротина Т.Ю. – заведующая аспирантурой и докторантурой ТУСУРа,  
канд. техн. наук;  
Ноздреватых Д.О. – ст. преподаватель каф. РТС ТУСУРа;  
Юрченкова Е.А., вед. инженер ОАиД ТУСУРа, канд. хим. наук

### Программный комитет

Рулевский В.М., д-р техн. наук; Лоцилов А.Г., канд. техн. наук;  
Сенченко П.В., канд. техн. наук; Абдрахманова М.В.;  
Акулиничев Ю.П., д-р техн. наук; Аникин А.С., канд. техн. наук;  
Geringer V., PhD, Ravensburg, Germany; Голиков А.М., канд. техн. наук;  
Громов В.А., канд. техн. наук; Денисов В.П., д-р техн. наук;  
Захаров Ф.Н., канд. техн. наук; Ильчук А.Р., зам. директора по научной работе  
АО «НПП «Исток» имени А.И. Шокина», г. Фрязино, д-р техн. наук, проф.;  
Киселев О.Н., д-р техн. наук; Красненко Н.П., д-р физ.-мат. наук;  
Kruglov R., PhD, Germany; Куприц В.Ю., канд. техн. наук;  
Лебедев В.Ю., канд. техн. наук; Майстренко В.А., д-р техн. наук, проф., г. Омск;  
Матвиенко Г.Г., д-р физ.-мат. наук; Медовник А.В., канд. техн. наук;  
Мещеряков А.А., канд. техн. наук; Мелихов С.В., д-р техн. наук, проф.;  
Тисленко В.И., д-р техн. наук

Ш269 Шарыгинские чтения. Пятая международная научная конференция ведущих научных школ в области радиолокации, радионавигации и радиоэлектронных систем передачи информации, 11–13 октября 2023 г., г. Томск : материалы конференции. – Томск : Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2023. – 254 с.

ISBN 978-5-6050216-7-4

Конференция приурочена ко дню рождения Германа Сергеевича Шарыгина. В ней приняли участие ученые и специалисты предприятий и организаций, преподаватели, научные сотрудники, аспиранты и студенты высших учебных заведений России. Обсуждались вопросы по направлениям: радиофизика и распространение радиоволн; радиотехнические системы; сети и системы связи; интеллектуальные системы; взаимодействие вузов с предприятиями ОПК.

ББК 32.84

ISBN 978-5-6050216-7-4

© Томск. гос. ун-т систем упр.  
и радиоэлектроники, 2023

*Посвящается памяти  
профессора Томского государственного  
университета систем управления  
и радиоэлектроники академика  
Германа Сергеевича Шарыгина*

Уважаемые участники и гости V международной научной конференции ведущих научных школ в области радиолокации, радионавигации и радиоэлектронных систем передачи информации «Шарыгинские чтения»!

В 2023 году проводится V международная научная конференция! Традиции научной школы продолжают и развиваются, расширяются связи в международном научном сообществе. Коллектив кафедры радиотехнических систем и Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники поддерживают память о профессоре Германе Сергеевиче Шарыгине.

Данная конференция предоставляет широкую площадку для обмена мнениями и знаниями по многим актуальным вопросам и проблемам науки и образования и является важной для сближения позиций участников, изучения методического и методологического опыта, формирования общественно востребованных заданий на теоретические и практические разработки. Хорошей традицией стало то, что в работе конференции принимают участие ведущие российские и зарубежные исследователи, подводятся итоги научной работы и определяются цели развития на ближайшую перспективу. Хотелось бы отметить, что с каждым годом интерес к конференции возрастает и со стороны студенческой молодёжи. Уверен, что в ходе работы конференции мы услышим немало качественных докладов, посвященных актуальным проблемам развития и совершенствования систем радиолокации, радионавигации и радиоэлектронных систем передачи информации. В год знаменательного мероприятия желаю всем участникам конференции плодотворной работы и формирования новых ориентиров, способствующих повышению эффективности научных исследований.

Всего вам наилучшего, удачи и новых свершений!

*Мещеряков Александр Алексеевич,  
зав. каф. РТС, канд. техн. наук, доцент*

# Секция 1. РАДИОФИЗИКА И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

---

УДК 623.76 + 53.091

Н.П. Красненко, И.А. Рыбаков

## ПРОБЛЕМЫ И ВОЗМОЖНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

*Рассматриваются проблемы обнаружения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Представлен обзор материалов по анализу возможностей обнаружения БПЛА средствами радиолокационной, радио- и радиотехнической, оптико-электронной и акустической разведки. Основное внимание уделено акустическим методам обнаружения малоразмерных малоскоростных низколетящих дронов.*

***Ключевые слова:** беспилотный летательный аппарат, мультикоптер, акустика, обнаружение малоразмерных низколетящих аппаратов*

**Введение.** Применение беспилотных летательных аппаратов получило бурное развитие в последнее время для гражданских и особенно военных целей. В связи с этим весьма актуальной стала проблема обеспечения безопасности территорий и отдельных объектов от действий БПЛА. Для противодействия таким атакам необходимо своевременное обнаружение БПЛА, что является большой проблемой [1–10]. Если достаточно высоко летающие большие БПЛА самолетного типа своевременно обнаруживаются средствами ПВО, то малоразмерные малоскоростные и низколетящие БПЛА (в основном мультикоптеры) сложно засечь [3–7]. Ситуация усугубляется применением в конструкции БПЛА материалов, имеющих слабую отражательную способность, что затрудняет их обнаружение активными радиосредствами ПВО.

Цель данного обзорного доклада рассмотреть демаскирующие признаки БПЛА, провести анализ существующих средств и возможностей обнаружения малоразмерных малоскоростных низколетящих объектов для концентрации усилий по разработке эффективных систем их обнаружения и идентификации.

**Демаскирующие признаки и методы обнаружения.** Анализ демаскирующих признаков БПЛА представлен в работах [1, 7]. Обнаружение

беспилотных летательных аппаратов может осуществляться различными активными и пассивными средствами. В зависимости от целей, технических возможностей и условий задачи это могут быть:

- средства радиолокационной разведки (РЛР) – различные РЛС;
- средства радио- и радиотехнической разведки (РРТР) – станции контроля радиоизлучений, пеленгаторные посты;
- средства оптико-электронной разведки (ОЭР) – приборы теле- и видеонаблюдения в видимом и инфракрасном диапазонах;
- средства акустической разведки (АР) – микрофоны и звукоулавливатели.

Данные средства целесообразно использовать совместно, так как они взаимно дополняют друг друга.

При этом основными средствами целеуказания для комплексов ПВО являются РЛС, а для комплексов радиоэлектронного подавления (РЭП) – средства РРТР. Общие недостатки применения активных радиосредств обнаружения обусловлены характеристиками объекта обнаружения. Это малые размеры, слабая отражаемость, низкая высота и скорость полета. Также существует ограниченная способность идентификации объекта обнаружения. При создании зоны покрытия возникают проблемы электромагнитной помехоустойчивости, высокого энергопотребления и стоимости.

Оптические пассивные методы наблюдения обладают высокой разрешающей способностью, что позволяет видеть и идентифицировать БПЛА. Однако они требуют хорошей видимости в атмосфере и открытости трассы наблюдения, что существенно влияет на дальность обнаружения объекта. Применение активных лазерных локационных средств (лидаров) увеличивает дальность обнаружения, но имеются проблемы при поиске объекта обнаружения в пространстве и засветки (помехи) в дневное время при солнечной погоде.

Акустические пассивные методы обнаружения работают по приходящим звуковым сигналам от БПЛА. Дальность обнаружения от десятков метров до километра. Они особенно полезны для обнаружения малоразмерных и низколетящих (зависающих) мультикоптеров в условиях плохой видимости. Их стоимость существенно ниже радарных методов. Целесообразно создание сети таких обнаружителей. К недостаткам АР относится зависимость дальности обнаружения от атмосферных условий распространения звука (прежде всего от ветра, но и мультикоптеры при сильном ветре не летают). Кроме того, негативно влияют посторонние шумы.

**Сравнительные характеристики методов и средств обнаружения.** В таблице 1 дана оценка возможностей различных средств обнаружения малоразмерных БПЛА [1].

Таблица 1 – Возможности различных типов средств разведки при решении задач обнаружения, идентификации и сопровождения БПЛА

Характеристика	Радио		Оптические			Акустические
	Средства РЛС	Средства РРТР	Средства ОЭР в видимом диапазоне	Средства ОЭР в ИК-диапазоне	Лазерные средства	Средства АР
Обнаружение в дневное время	+	+	+	-	+	+
Обнаружение в ночное время	+	+	-	+	+	+
Обнаружение в условиях естественных помех	+	+	+	+	+	+
Обнаружение среди естественных объектов (прежде всего среди птиц)	-	+	-	-	-	±
Обнаружение в сложных погодных условиях	±	+	-	-	-	-
Идентификация	-	+	±	±	-	+
Селекция одиночных и групповых целей	+	+(По различным каналам)	+	+	+	+(Для БПЛА различных типов)
Сопровождение и формирование траектории	+	+(Для многопозиционной системы)	+	+	+	+(Для многопозиционной системы)
Дальность действия	Высокая	Высокая	Средняя	Средняя	Средняя	Низкая

Стоит отметить, что дальность обнаружения зависит от многих факторов, таких как погодные условия, модель и массогабаритные характеристики летательного аппарата, высота его полета над землей

и др. Поэтому оценка дальности носит относительный характер, взята из различных источников для разных аппаратов при различных условиях проведения измерений.

**Акустические методы обнаружения.** Касаясь акустических методов, необходимо сказать, что еще в прошлом веке для обнаружения самолетов достаточно эффективно использовались звукоулавливатели. Дальность обнаружения самолетов достигала нескольких километров и больше. С развитием систем радиолокации, обладавших большей дальностью и точностью обнаружения, от них отказались. Тем не менее в настоящее время акустические системы развиваются, претерпевают второе рождение и имеют дальнейшие перспективы использования для обнаружения малоразмерных низколетящих БПЛА [7–13]. Они напрямую связаны с машинным обучением и внедрением нейронных сетей, а также с разработкой алгоритмов для детальной обработки акустических сигнатур в приемной части системы. Всё это в совокупности может повысить вероятность обнаружения и идентификации объекта на фоне шумов окружающей среды.

Акустическая сигнатура дрона зависит от различных факторов, таких как размеры, конструкция, тип привода и настройки двигателя [1, 7, 10].

В качестве примера работы акустических систем рассмотрим два типа БПЛА [9]: Phantom 4 массой 1,3 кг (рисунок 1,а) и более крупный съёмочный M600 массой 9,6 кг (рисунок 1,б), а также две акустические системы для их обнаружения: DADS и OptiNav.



а



б

Рисунок 1 – Исследуемые модели БПЛА: квадрокоптер Phantom 4 (а) и гексакоптер M600 (б)

На рисунке 2,а показан один из комплектов многопозиционной системы DADS для обнаружения и пеленгования БПЛА на основе приема и обработки приходящего шума пропеллеров. Аудиоданные используются для классификации сигнатуры, а многопозиционность благодаря трем отдельно расположенным приемникам обеспечивает локализацию БПЛА в пространстве в режиме реального времени. Оцифрованные

акустические сигналы со всех микрофонов по беспроводной сети передаются на центральный компьютер, где осуществляется обработка сигналов для обнаружения, отслеживания и классификации БПЛА. Система оснащена специально изготовленными микрофонами (рисунок 2,б). Данные собираются с четырех микрофонов, передаются в компьютер, где обрабатываются, отображаются и сохраняются. Микрофоны расположены в виде тетраэдра с регулируемым расстоянием (при испытаниях сторона решетки составляла 53 см). Среднее расстояние между узлами системы 80–120 м.



а



б

Рисунок 2 – Одиночный узел системы акустического обнаружения дронов DADS (а), единственный микрофон системы (б)

Акустическая решетка системы OptiNav (рисунок 3,а) имеет 40 микрофонов на пластине размером 40×40 см. На рисунке 3,б показана установка акустических регистраторов, состоящая из 5 микрофонов в пирамидальной конфигурации. На рисунке 3,в приведена акустическая двухъярусная перекрестная решетка. На рисунке 3,г показано совместное использование направленного микрофона (Rode NTG8) с видеокамерой, что обеспечивает одновременную запись звука и видео с заданного направления. На рисунке 3,д представлены два параболических направленных микрофона: на антенне COTS (JonyShot 24 дюйма) и изготовленный из металлического отражателя.

Результаты испытаний по обнаружению гексакоптера M600 и квадрокоптера Phantom 4 различными акустическими системами приведены в таблице 2 [9].

Из приведенных данных сложно судить о влиянии атмосферы на характеристики обнаружения. Только видно, что, чем меньше уровень внешнего шума, тем больше дальность обнаружения. Но даже обнаружение коптеров на относительно небольших дальностях в сотни и десятки метров является весьма актуальной задачей. Точность пеленгации коптеров получается высокая.



Рисунок 3 – Система акустического обнаружения OptiNav (а); пирамидальная акустическая система (б); двухъярусная перекрестная решетка (в); направленный микрофон с видеокамерой (г); параболические направленные микрофоны (д)

Таблица 2 – Результаты испытаний систем обнаружения БПЛА

Условия испытаний	Система акустического обнаружения	Модель коптера	Точность определения направления, град	Дальность обнаружения, м
Ветер 2–6 м/с Температура 24 °С Относительная влажность 50 % Шум 60–71 дБ·А	DADS	M600	1,2	130
		Phantom 4	1,6	85
	OptiNav	M600	1,9	170
		Phantom	1,5	105
Ветер 2–5 м/с Температура 32 °С Солнечно Шум 52–60 дБ·А	DADS	M600	1	300
		Phantom 4	3,2	155
	OptiNav	M600	1,5	255
		Phantom 4	2,2	130

Имеются и другие акустические системы промышленного производства для обнаружения БПЛА. Так, система Discovair G2 (рисунок 4) построена на основе массивов (до четырех) из 128 микрофонов (антенных решеток) и может определять азимут и угол места цели в режиме реального времени [11].



Рисунок 4 – Акустическая система обнаружения дронов Discovair

В зависимости от типа дрона и уровня звука обеспечивалось обнаружение на расстоянии до 500 м.

Модульная система обнаружения и защиты от БПЛА DROKA / FEDAI [12] разработана турецкими компаниями Havelsan и Transvaro. В ней реализованы все основные принципы, используемые сегодня для обнаружения и борьбы с БПЛА. Каждый используемый для обнаружения способ хорош по-своему, но имеет определенные ограничения. Например, РЛС обеспечивает большую дальность, но её эффективность снижается при обнаружении малоразмерных целей. ЛИДАР компенсирует этот недостаток, но в пределах меньшей дальности. Поэтому все обнаружители используются комплексно. Возможности этой системы представлены на рисунке 5.



Рисунок 5 – Возможности комплексной системы обнаружения

Сообщается о разработке аппаратно-программного комплекса для быстрого распознавания дронов по акустическому следу [13]. Разрабатываемая система хорошо подходит для обнаружения широкого круга квадрокоптеров гражданского назначения с массой до 200 г и высотой полета до 100 м. Система реализуется в виде сети микрофонов с защитой от сложных погодных условий, включает сервер и специализированное программное обеспечение для записи и анализа звуковых сигналов с системой оповещения по электронной почте и смс. В ней предусмотрен потоковый сбор входных сигналов, позволяющий параллельную запись и обработку звуковых колебаний. Размещать систему предполагается по периметру зоны наблюдения. Основная идея состоит в реализации сети таких систем для распознавания звуковых колебаний. Между собой узлы сети могут быть соединены проводным или беспроводным способом в зависимости от конкретных задач и условий. Также возможны различные конфигурации аппаратной части, которые оказывают существенное влияние на дальность работы и требования к погодным условиям. В ходе тестовых испытаний система показала

хорошие результаты при распознавании звуков беспилотных летательных аппаратов, в том числе на фоне зашумленного спектра.

**Заключение.** Исследования показывают, что использование метода пассивного акустического обнаружения дронов является перспективным подходом, который может быть эффективным при построении систем обнаружения и идентификации дронов. Однако необходимы дополнительные исследования и эксперименты для оптимизации алгоритмов и разработки промышленных решений. Акустическое обнаружение дронов имеет широкий потенциал.

Пассивные акустические средства обнаружения дронов дешевле по сравнению с другими, не требуют сложного оборудования и инфраструктуры. Поэтому они более доступны для защиты различных объектов и территорий. При правильном построении измерительной сети такие средства могут обеспечить высокую вероятность обнаружения дронов. Что касается меньшей дальности обнаружения, то их ниша – это обнаружение малоразмерных малоскоростных низколетящих объектов, т.е. мультикоптеров.

Акустическое обнаружение и идентификация беспилотных летательных аппаратов с использованием нейронных сетей также должно стать инновационным и перспективным направлением в области обеспечения безопасности и обороны. Нейронные сети могут быть эффективными инструментами для обнаружения БПЛА на основе обработки звуковых сигналов.

Целесообразно построение и применение комбинированных систем обнаружения. Так, акустическое обнаружение дронов может быть использовано в комбинации с другими технологиями и средствами, такими как радар, видеонаблюдение и инфракрасное обнаружение. Это позволит улучшить общую надежность и точность обнаружения дронов.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российской академии наук в рамках государственного задания ИМКЭС СО РАН.*

### **Список использованной литературы**

1. Макаренко С.И. Противодействие беспилотным летательным аппаратам : моногр. СПб. : Научно-технологические институты, 2020. 240 с.
2. Ростопчин В.В. Ударные беспилотные летательные аппараты и противовоздушная оборона – проблемы и перспективы противостояния // Беспилотная авиация. 2019. URL: [https://www.researchgate.net/publication/331772628\\_Udarnye\\_bespilotnye\\_letatelnye\\_apparaty\\_i\\_protivovozdusnaa\\_oborona\\_-\\_problemy\\_i\\_perspektivy\\_protivostoania](https://www.researchgate.net/publication/331772628_Udarnye_bespilotnye_letatelnye_apparaty_i_protivovozdusnaa_oborona_-_problemy_i_perspektivy_protivostoania) (дата обращения: 20.05.2019).

3. Самойлов П.В., Иванов К.А. Угрозы применения малоразмерных БПЛА и определение наиболее эффективного способа борьбы с ними // Молодой ученый. 2017. № 45. С. 59–65. URL: <https://moluch.ru/archive/179/46398/> (дата обращения: 21.09.2019).
4. Митрофанов Д.Г., Шишков С.В. Инновационный подход к вопросу обнаружения малогабаритных беспилотных летательных аппаратов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2018. № 1 (195). С. 28–40.
5. Еремин Г.В., Гаврилов А.Д., Назарчук И.И. Малоразмерные беспилотники – новая проблема для ПВО // Отвага. 2015. № 6 (14). URL: <http://otvaga2004.ru/armiya-i-vpk/armiya-i-vpk-vzglyad/malorazmernye-bespileotniki/> (дата обращения: 11.12.2019).
6. Еремин Г.В., Гаврилов А.Д., Назарчук И.И. Организация системы борьбы с малоразмерными БПЛА // Арсенал Отечества. 2014. № 6 (14). URL: <http://arsenal-otechestva.ru/new/389-antidrone> (дата обращения: 11.12.2019).
7. Особенности обнаружения и распознавания малых беспилотных летательных аппаратов / В.М. Карташов, В.Н. Олейников, С.А. Шейко [и др.] // Радиотехника. Украина. 2018. № 195. С. 235–243. URL: [http://openarhive.nure.ua/bitstream/document/9513/1/Kartashov\\_235\\_243.pdf](http://openarhive.nure.ua/bitstream/document/9513/1/Kartashov_235_243.pdf) (дата обращения: 11.12.2019).
8. Drone and Controller Detection and Localization: Trends and Challenges / J. Yousaf, H. Zia, M. Alhalabi [et al.] // Appl. Sci. 2022. V. 12. P. 12612.
9. Stevens Drone Detection Acoustic System and Experiments in Acoustics UAV Tracking / A. Sedunov, D. Haddad, H. Salloum [et al.] // Proceedings of the IEEE International Symposium on Technologies for Homeland Security (HST). Woburn, MA, USA, 5–6 November 2019. P. 1–7.
10. An Acoustic-Based Surveillance System for Amateur Drones Detection and Localization / Zhiguo Shi, Xianyu Chang, Chaoqu Yang [et al.] // IEEE Transactions on Vehicular Technology. January 2020. 10 p. DOI: 10.1109/TVT.2020.2964110.
11. Drone detection – Squarehead Technology. URL: <https://www.sqhead.com/drone-detection/#1539176966676-a49b192e-aa00> (дата обращения: 17.09.2023).
12. Acoustic UAV Detection System. URL: <https://transvaro.com/en/uav-detection-defence-systems/acoustic-uav-detection-system/> (дата обращения: 17.09.2023).
13. В России разработали систему быстрого обнаружения дронов. URL: <https://nauka.tass.ru/nauka/18704067> (дата обращения: 17.09.2023).

---

*Красненко Николай Петрович – д-р физ.-мат. наук, проф., каф. радиотехнических систем, Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40; гл. науч. сотрудник, Лаборатория акустических исследований, Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, 634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3, e-mail: krasnenko@imces.ru.*

*Рыбаков Иван Андреевич – аспирант, инженер, Лаборатория акустических исследований, Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, 634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3, e-mail: vano\_98@bk.ru.*

### **PROBLEMS AND POSSIBILITIES OF DETECTING UNMANNED AERIAL VEHICLES**

*Problems of detecting unmanned aerial vehicles (UAV) are considered. The review of available materials on analysis of possibilities for the UAV detection using radar, radio, radio engineering, optoelectronic, and acoustic reconnaissance are considered. Attention is focused on acoustic methods of detecting small-size low-speed low-flying drones.*

**Keywords:** *unmanned aerial objects, multicopter, acoustics, detecting small-size low-flying drones*

*Krasnenko Nikolay Petrovich – Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Department of Radio Engineering Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40, Lenin Ave., Tomsk 634050, Russia; Chief Researcher, Laboratory of Acoustic Researches, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, 10/3, Akademicheskii Ave., Tomsk 634055, Russia, e-mail: krasnenko@imces.ru.*

*Rybakov Ivan Andreevich – The post-graduate student, engineer, Laboratory of Acoustic Researches, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, 10/3, Akademicheskii Ave., Tomsk 634055, Russia, e-mail: vano\_98@bk.ru.*

Н.П. Красненко, А.Я. Богушевич, С.А. Кураков,  
А.С. Раков, И.А. Рыбаков

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕМАСКИРУЮЩИХ ПРИЗНАКОВ ПРИ ПОЛЕТЕ КВАДРОКОПТЕРОВ ДЛЯ ИХ ОБНАРУЖЕНИЯ

*Обсуждаются проблемы обнаружения малоразмерных беспилотных летательных аппаратов (мультикоптеров). Представлены результаты экспериментов по исследованию возникающих атмосферных возмущений и акустических признаков при полете квадрокоптеров. Рассматриваются возможности пассивного и активного обнаружения мультикоптеров.*

*Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, мультикоптер, активное и пассивное обнаружение, акустический спектр, ветровые потоки, турбулентность*

Проблема обнаружения малоразмерных малоскоростных низколетающих беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) стала чрезвычайно актуальной в последнее время вследствие обеспечения безопасности отдельных объектов и территорий [1–11]. К ним прежде всего относятся БПЛА вертолетного типа, или мультикоптеры (аппараты с различным количеством пропеллеров). В силу своих особенностей они являются достаточно сложными целями для своевременного обнаружения. Общий анализ состояния проблемы по обнаружению БПЛА, в частности мультикоптеров, дан в [1].

Построение систем обнаружения основано на использовании демаскирующих признаков БПЛА [2]. Помимо радиоизлучения для управления и связи, БПЛА имеет оптическую видимость, обладает отражательной способностью, возмущает среду – атмосферу, и создает акустический шум за счет работы двигателя и пропеллеров. Акустические эффекты широко используются для обнаружения [4–11], поэтому являются объектом нашего исследования с целью возможного использования при построении системы обнаружения.

**Аппаратура и методика исследований.** Для исследования демаскирующих эффектов использовались два квадрокоптера: легкий самодельной сборки KSA-1 и более тяжелый Walkera Voyager 3 (рисунок 1). KSA-1 имеет расстояние между осями роторов 150 мм и 200 мм в разных координатах, длину пропеллера 125 мм.



а



б

Рисунок 1 – Используемые в экспериментах квадрокоптеры:  
а – самодельной сборки KSA-1; б – Walkera Voyager 3



Рисунок 2 – Квадрокоптер KSA-1 над ультразвуковой метеостанцией

Для оценки возмущений в атмосфере при полете квадрокоптеров использовалась ультразвуковая метеорологическая станция [12–14], которая располагалась на крыше пятиэтажного здания и работала в автоматическом режиме. Квадрокоптер пролетал и зависал над ней некоторое время (рисунок 2). Высота расположения непосредственно ультразвукового измерителя 27 м над землей, частота измерения метеоданных 80 Гц, интервал обработки данных составлял 1 мин (по 4800 точек текущих измерений). Определялись средние за интервал метеовеличины: температура воздуха, давление, влажность, три компонента скорости ветра, его направление. Также вычислялись характеристики турбулентности: энергия, потоки тепла и импульса, масштаб

Монина – Обухова; структурные постоянные температуры, скорости ветра, показателя преломления оптических волн.

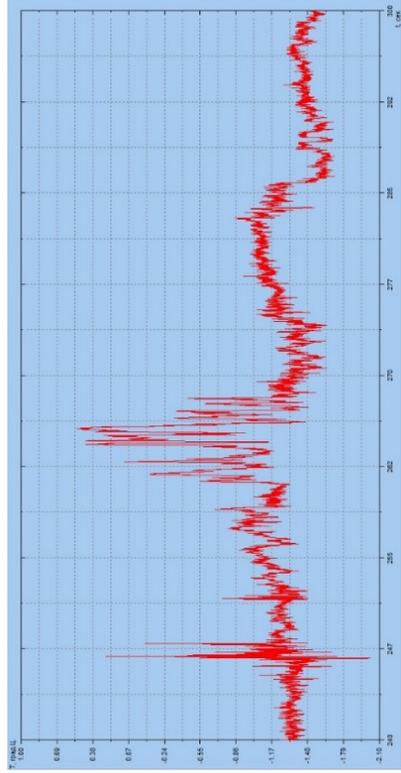
Для измерения спектральных характеристик акустического шума от БПЛА использовался шумомер ЭКОФИЗИКА-110А с установленным измерительным микрофоном М-201 и предусилителем Р200 [15]. На расстоянии 1 м от оси микрофона фиксировался квадрокоптер на неподвижном основании. С помощью пульта управления имитировался режим полета вверх длительностью 20 с (задавая нагрузку на винты для подъемной силы) и режим спуска длительностью 15 с с одновременной аудиозаписью на шумомер. Результаты спектральных измерений шума получались и отображались с использованием программного обеспечения шумомера.

Для проверки возможностей пассивного и активного акустического обнаружения БПЛА использовался также моностатический акустический локаатор вертикального зондирования (большой содар) [16]. Он находился на измерительной площадке, расположенной на крыше четырехэтажного здания на высоте 20 м над землей. Локаатор работает на приемопередающей параболической антенне диаметром 1,6 м до высоты 720 м. В качестве облучателя (и приемника) использовались четыре громкоговорителя (драйвера), синфазно работающих на рупор специальной конструкции. Несущая частота зондирования составляла 1800 Гц, длительность акустического импульса – 0,15 с, период зондирования – 5 с, полоса приемника – 300 Гц. Подъем и спуск квадрокоптеров производился вдоль оси диаграммы направленности антенны локаатора. При активном режиме локаатор осуществлял зондирование атмосферы, а при пассивном выключался усилитель мощности сигнала и локаатор работал только на прием как направленный микрофон.

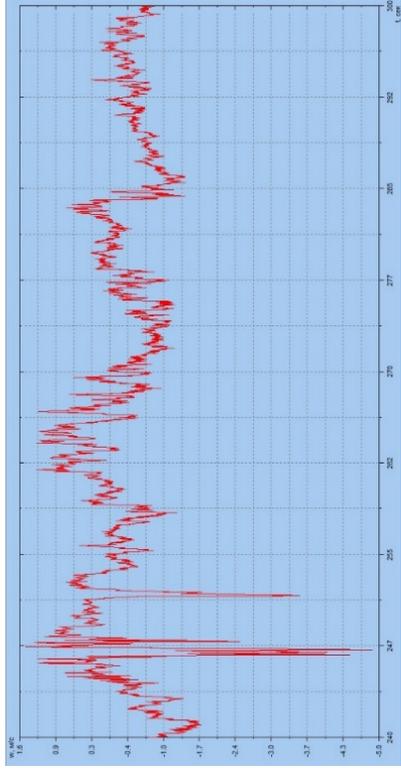
**Результаты исследований.** Были проведены три серии экспериментов с квадрокоптерами: 16.03.2023, 25.06.2023 и 07.06.2023. Измерение атмосферных возмущений выполнялось с квадрокоптером KSA-1. Он зависал в нескольких метрах над датчиком метеостанции некоторое время (см. рисунок 2).

В первом эксперименте утром при полете квадрокоптера KSA-1 с 9:50 наблюдалась сильная приземная инверсия, которая примерно с 10:00 начала ослабевать (поворот ветра с юго-запада на запад, возрастание масштаба Монины – Обухова  $L$ ). Стандартные отклонения составили для температуры  $\sigma_T$  около 0,4 К; для скорости ветра  $\sigma_V$  около 0,5 м/с.

На рисунке 3 приведены записи мгновенных значений температуры  $T$  и вертикальной составляющей скорости ветра  $w$ , полученные с частотой 80 Гц в течение 1 мин с 10:12 до 10:13. Здесь в районе 247 с (около 10:12:07) видны возмущения температуры  $T$  и скорости  $w$ , обусловленные близким пролетом дрона. Трудно было удерживать квадрокоптер прямо над мачтой в режиме зависания. Результаты измерений показывают, что энергия турбулентности увеличивается в несколько раз. Из структурных характеристик наибольшее изменение происходит у структурной постоянной скорости ветра, которая также увеличивается в несколько раз. Как раз структурные постоянные и определяют величину рассеянного сигнала для различных видов излучений, а соответственно возможность использования активных видов локации возмущений в атмосфере, созданных БПЛА.



*a*



*b*

Рисунок 3 – Минутные записи (с 10:12 до 10:13): *a* – температуры воздуха, °С;

*b* – вертикальной составляющей скорости ветра, м/с

Другие измерения были проведены при полете квадрокоптеров вдоль вертикальной оси диаграммы направленности антенны акустического лоатора. На рисунке 4 приведен один из примеров эксперимента 25.06.2023 по зондированию атмосферы лоатором с фиксацией запуска квадрокоптера Walkera Voyager 3 (вертикальный подъем и спуск). На записи лоатора наблюдается неустойчивая стратификация атмосферы (перьевая структура, конвективные потоки – термики) до высоты 700 м с 10:45 до 11:58 местного времени. Примерно с 11:13 до 11:20 осуществлялся полет квадрокоптера до высоты 550 м и спуск. Он отмечен темной полосой (засветкой) во всем интервале высот. Слева от разделительной полосы фиксируется подъем квадрокоптера (лоатор работает в активном режиме), справа – спуск квадрокоптера (лоатор работает в пассивном режиме, только на прием). Таким образом, в данном эксперименте проиллюстрирована возможность обнаружения квадрокоптеров при работе в активном и пассивном режимах до высоты 700 м.

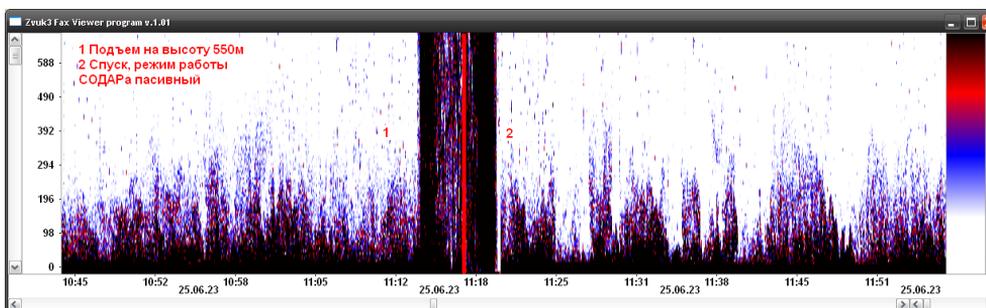


Рисунок 4 – Высотно-временная запись термической структуры атмосферы при запуске квадрокоптера Walkera Voyager 3 до высоты 550 м. Яркость определяет интенсивность принимаемого сигнала (шкала справа)

**Заключение.** Предварительные результаты проведенных исследований атмосферных возмущений и акустических шумов, возникающих при полете квадрокоптеров, выявили их демаскирующие признаки. Эти признаки частично используются (акустические шумы) и могут использоваться при разработке новых систем лазерной, акустической и радиолокации.

Показана возможность обнаружения коптеров существующими активными и пассивными акустическими средствами.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российской академии наук в рамках государственного задания ИМКЭС СО РАН.*

## Список использованной литературы

1. Красненко Н.П., Рыбаков И.А. Проблемы и возможности обнаружения беспилотных летательных аппаратов // Шарыгинские чтения. Пятая международная научная конференция ведущих научных школ в области радиолокации, радионавигации и радиоэлектронных систем передачи информации, 11–13 октября 2023 г., Томск : Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2023.
2. Макаренко С.И., Тимошенко А.В., Васильченко А.С. Анализ средств и способов противодействия беспилотным летательным аппаратам. Ч. 1. Беспилотный летательный аппарат как объект обнаружения и поражения // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 1. С. 109–146.
3. Теодорович Н.Н., Строганова С.М., Абрамов П.С. Способы обнаружения и борьбы с малогабаритными беспилотными летательными аппаратами // Интернет-журнал «Науковедение». 2017. Т. 9, № 1. 7 с. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/13TVN117.pdf> (дата обращения: 15.09.2023).
4. Экспериментальная оценка эффективности алгоритмов пеленгования беспилотных летательных аппаратов по акустическому излучению / В.Н. Олейников, О.В. Зубков, В.М. Карташов [и др.] // Радиотехника. Украина. 2019. № 199. С. 29–37.
5. A review of UAV Visual Detection and Tracking Methods / Raed Abu Zitar, Mohammad Al-Betar, Mohamad Ryalat [et al.] // arXiv:2306.05089v1 [cs.CV]. 8 Jun 2023. 10 p.
6. Bowon Yang. UAV Detection Systems with Multiple Acoustic Nodes using Machine Learning Models // A Thesis Master Science. Purdue University. West Lafayette. Indiana. USA. May 2019. 49 p.
7. Detection and tracking of drones using advanced acoustic cameras / J. Busset, F. Perrodin, P. Wellig [et al.] // Proc. of SPIE. 2015. V. 9647. 96470F. 8 p.
8. Casabianka P., Zhang Y. Acoustic-Based UAV Detection Using Late Fusion of Deep Neural Networks // Drones. 2021. V. 5, N 54. 14 p.
9. Utebaeva D.Z. Research of effective UAV detection using acoustic data recognition // Thesis for the Degree of PhD. Satbayev University. Republic of Kazakhstan. Almaty. 2023. 91 p.
10. Florian-Lucian Chipier, Alexandru Martian, Calin Vladeanu, Ion Marghescu [et al.] // Sensors. 2022. V. 22, N 1453. 27 p.
11. Пат. № 2749651 С1. Российская Федерация. Акустический способ обнаружения беспилотных летательных аппаратов : опубл. 16.06.2021 : бюл. № 17 / Серкачев П.Ю., Косогор А.А., Тихов Ю.И.

12. Богушевич А.Я. Ультразвуковые методы оценивания метеорологических и турбулентных параметров атмосферы // Оптика атмосферы и океана. 1999. Т. 12, № 2. С. 170–174.

13. Автоматизированный ультразвуковой метеорологический комплекс АМК-03 / А.А. Азбукин, А.Я. Богушевич, В.С. Ильичевский [и др.] // Метеорология и гидрология. 2006. № 11. С. 89–97.

14. Ультразвуковой измерительный комплекс. URL: <http://meteosar.ru/catalog/amk-03/> (дата обращения: 19.09.2023).

15. Экофизика 110 А. URL: <https://www.octava.info/ecophysica-110A> (дата обращения: 19.09.2023).

16. Красненко Н.П. Развитие дистанционных методов и средств изучения нижней атмосферы в ИМКЭС СО РАН // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35, № 2. С. 98–104.

---

*Красненко Николай Петрович – д-р физ.-мат. наук, проф., каф. радиотехнических систем, Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40; гл. науч. сотрудник, Лаборатория акустических исследований, Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, 634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3, e-mail: [krasnenko@imces.ru](mailto:krasnenko@imces.ru).*

*Богушевич Александр Яковлевич – канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник, Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, 634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3, e-mail: [bay@imces.ru](mailto:bay@imces.ru).*

*Кураков Сергей Анатольевич – канд. техн. наук, науч. сотрудник, Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, 634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3, e-mail: [ksa@imces.ru](mailto:ksa@imces.ru).*

*Раков Александр Сергеевич – мл. науч. сотрудник, Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, 634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3, e-mail: [alexanderrakov1985@gmail.com](mailto:alexanderrakov1985@gmail.com).*

*Рыбаков Иван Андреевич – аспирант, инженер, Лаборатория акустических исследований, Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, 634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3, e-mail: [vano\\_98@bk.ru](mailto:vano_98@bk.ru).*

## **INVESTIGATION OF UNMASKING FEATURES OF FLYING QUADCOPTERS FOR THEIR DETECTION**

*Problems of detecting small-sized unmanned aerial vehicles (multicopters) are discussed. Results of experiments on the study of atmospheric perturbations and acoustic features created by flying quadcopters have been presented. Possibilities of passive and active multicopter detection are considered.*

**Keywords:** *unmanned flying vehicles, multicopter, active and passive detection, acoustic spectrum, wind flows, turbulence*

*Krasnenko Nikolay Petrovich – Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Department of Radio Engineering Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40, Lenin Ave., Tomsk 634050, Russia; Chief Researcher, Department of Geophysical Research, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, 10/3, Akademicheskii Ave., Tomsk 634055, Russia, e-mail: krasnenko@imces.ru.*

*Bogushevich Alexander Yakovlevich – Senior Researcher, Department of Geophysical Research, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, 10/3, Akademicheskii Ave., Tomsk 634055, Russia, e-mail: alexanderrakov1985@gmail.com.*

*Kurakov Sergey Anatolyevich – Researcher, Department of Geophysical Research, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, 10/3, Akademicheskii Ave., Tomsk 634055, Russia, e-mail: alexanderrakov1985@gmail.com.*

*Rakov Alexander Sergeevich – Junior Researcher, Department of Geophysical Research, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, 10/3, Akademicheskii Ave., Tomsk 634055, Russia, e-mail: alexanderrakov1985@gmail.com.*

*Rybakov Ivan Andreevich – The post-graduate student, engineer, Laboratory of Acoustic Researches, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, 10/3, Akademicheskii Ave., Tomsk 634055, Russia, e-mail: vano\_98@bk.ru.*

**УДК 621.391.825**

**С.В. Власов, Н.С. Павлов, Е.С. Жечев**

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СИГНАЛА В СВЯЗАННОЙ МИКРОПОЛОСКОВОЙ ЛИНИИ**

*Исследуется связанная микрополосковая линия двумя методами: квазистатическим и электродинамическим. В системе TALGAT построено поперечное сечение линии и вычислены ее погонные параметры. Электродинамическим методом получены S-параметры, которые были преобразованы в погонные параметры с помощью экстракции. Анализ корреляции результатов моделирования произведен посредством вычисления временных откликов.*

**Ключевые слова:** микрополосковая линия, квазистатическое моделирование, электродинамическое моделирование, экстракция, погонные параметры, S-параметры, временной отклик

**Введение.** В современных радиоэлектронных средствах микрополосковые линии (МПЛ) используются для передачи сигнала, фильтрации, в качестве излучающей антенны и т.д. [1]. Чтобы получить полное представление, как распространяются электромагнитные волны в таких линиях, необходимо проводить тщательное математическое моделирование [2]. Для моделирования электромагнитных процессов, связанных с распространением импульсных сигналов в линиях передачи, используют погонные параметры, которые описывают сопротивление, индуктивность, емкость и проводимость линии на единицу длины [3]. Чтобы математическое моделирование было достоверным, его необходимо проводить несколькими методами. Цель данной работы – математическое моделирование и анализ распространения сигнала в МПЛ.

**Математическое моделирование МПЛ.** В качестве исследуемой структуры выбрана связанная МПЛ со следующими параметрами: ширина сигнального проводника  $w = 3,28$  мм, толщина сигнального проводников  $t = 35$  мкм, относительная диэлектрическая проницаемость подложки  $\epsilon_r = 4,4$ , расстояние между проводниками  $s = 3,28$  мм, расстояние от края подложки до проводников  $d = 3w$ , толщина подложки  $h = 2$  мм, длина линии  $l = 6,063$  м. Сопротивление резисторов  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 50$  Ом. На рисунке 1 представлены поперечное сечение и схема включения связанной МПЛ.

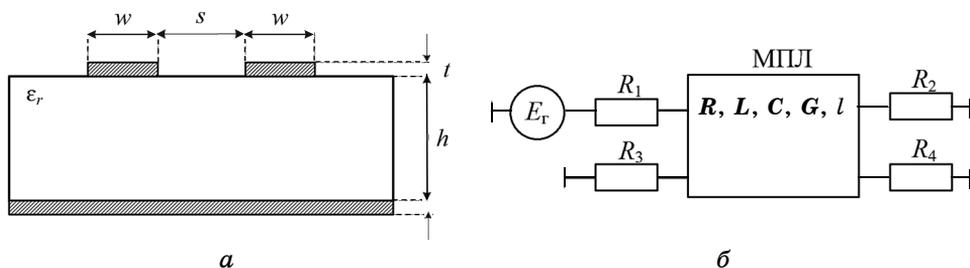


Рисунок 1 – Поперечное сечение (а) и схема включения (б) связанной микрополосковой линии

Для вычисления погонных параметров связанной МПЛ квазистатическим методом использовалась система TALGAT [4], посредством которой осуществлялось построение поперечного сечения с заданными параметрами и рассчитывались погонные параметры линии. Электродинамическим методом вычислялись S-параметры МПЛ, которые при

помощи алгоритма экстракции [5] преобразовывались в погонные параметры МПЛ.

В таблице 1 представлены погонные параметры, вычисленные двумя методами на частоте  $f = 1$  ГГц. Расчет отклонений в значениях результатов двух методов осуществлялся на основе норм Фробениуса по формуле

$$\Delta_{\%} = \frac{\|P_{\text{Ext}} - P\|}{\|P_{\text{Ext}}\|} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где  $P_{\text{Ext}}$  – норма Фробениуса матриц погонных параметров, вычисленных с помощью экстракции;  $P$  – норма Фробениуса матриц погонных параметров, вычисленных в системе TALGAT.

Таблица 1 – Погонные параметры связанной микрополосковой линии

Параметр	Экстракция	Система TALGAT
$R$ , Ом/м	$\begin{bmatrix} 2,8536 & 0,1909 \\ 0,1909 & 2,8536 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 2,9461 & 0,1954 \\ 0,1954 & 2,9461 \end{bmatrix}$
$L$ , мкГн/м	$\begin{bmatrix} 0,3277 & 0,0366 \\ 0,0366 & 0,3277 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,3267 & 0,0368 \\ 0,0368 & 0,3267 \end{bmatrix}$
$C$ , пФ/м	$\begin{bmatrix} 111,17 & -4,881 \\ -4,881 & 111,17 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 111,01 & -4,897 \\ -4,897 & 111,01 \end{bmatrix}$
$G$ , См/м	$\begin{bmatrix} 0,0155 & -0,00026 \\ -0,00026 & 0,0155 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,0154 & -0,00026 \\ -0,00026 & 0,0154 \end{bmatrix}$
Среднее отклонение, %	1,0162	

Из таблицы видно, что вычисленные с помощью двух методов погонные параметры имеют близкие значения, общее отклонение составляет около 1 %.

**Анализ вычисленных погонных параметров.** Для апробации полученных результатов проведен анализ погонных параметров на основе вычисления временных откликов. В качестве входного воздействия использован сверхкороткий импульс (СКИ) с амплитудой ЭДС 1 В и временем нарастания, плоской вершины и спада по 100 пс (рисунок 2,а). Построение временных откликов (рисунок 2,б) проводилось в системе TALGAT с использованием схемы включения МПЛ, показанной на рисунке 1,б. В блок модели МПЛ загружались погонные параметры, вычисленные с помощью двух методов.

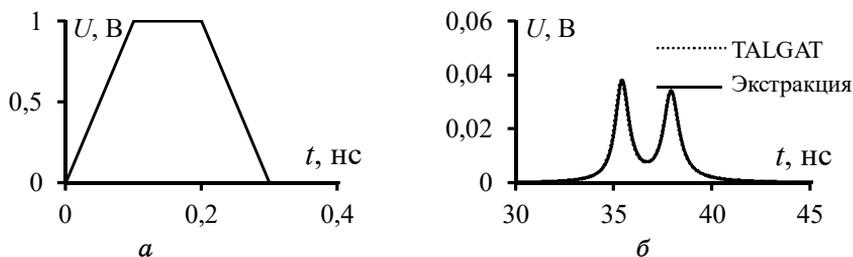


Рисунок 2 – Форма воздействующего сверхкороткого импульса (а) и временной отклик на его воздействие (б)

Как видно на рисунке, при распространении сигнала вдоль МПЛ произошло ослабление его амплитуды в 12,5 раза за счет разложения на два импульса с задержками 34,2 нс и 37 нс. Данные результаты обусловлены габаритами исследуемой МПЛ и ее геометрическими и физическими параметрами. На основе результатов исследования планируется проведение лабораторного эксперимента с целью анализа достоверности алгоритма экстракции [5].

### Список использованной литературы

1. Белоус А., Шведов С., Мерданов М. СВЧ-электроника в системах радиолокации и связи. Техническая энциклопедия. Кн. 1. М. : Litres, 2022.
2. Белоусов А.О., Черникова Е.Б., Куксенко С.П. Асимметрия матриц погонных параметров многопроводных линий передачи // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС-25-2019). 2019. С. 138–142.
3. Максимов А.Е., Куксенко С.П. Исследование методов построения адаптивных сеток при квазистатическом анализе многопроводных линий передачи методом моментов // Журнал радиоэлектроники. 2021. № 1. С. 8-8.
4. Новые возможности системы моделирования электромагнитной совместимости TALGAT / С.П. Куксенко [и др.] // Доклады ТУСУР. 2015. № 2 (36). С. 45–50.
5. Павлов Н.С., Заболоцкий А.М. Алгоритм экстракции погонных параметров линии передачи на основе S-параметров // Электронные средства и системы управления : материалы докл. Междунар. науч.-практ. конф. Томск : Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2022. № 1-1. С. 317–320.

---

*Власов Сергей Владиславович – магистрант, каф. телевидения и управления, Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, e-mail: lukashinka12@gmail.com.*

*Павлов Никита Сергеевич – магистрант, каф. телевидения и управления, Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, e-mail: pavlov.n@tu.tusur.ru.*

*Жечев Евгений Сергеевич – канд. техн. наук, ст. преподаватель каф. сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники, Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, e-mail: zhechev75@gmail.com.*

## **MATHEMATICAL MODELING OF SIGNAL PROPAGATION IN A COUPLED MICROSTRIP LINE**

*A coupled microstrip line is investigated by using quasi-static and electrodynamic approaches. The cross section of the line is designed in TALGAT system and the per-unit-length parameters are calculated. Using the electrodynamic approach, the S-parameters were obtained and converted into per-unit-length parameters by extraction. Correlation analysis of the obtained results was performed on the basis of calculation of time responses.*

**Keywords:** *microstrip line, quasi-static simulation, electrodynamic simulation, extraction, per-unit-length parameters, S-parameters, time response*

*Vlasov Sergey Vladislavovich – Master's student, Department of Television and Control, Tomsk State Univ. of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Lenin Ave. 40, 634050, e-mail: lukashinka12@gmail.com.*

*Pavlov Nikita Sergeevich – Master's student, Department of Television and Control, Tomsk State Univ. of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Lenin Ave. 40, 634050, Tomsk, e-mail: pavlov.n@tu.tusur.ru.*

*Zhechev Yevgeniy Sergeevich – Candidate of Technical Sciences, Department of Microwave and Quantum Radio Engineering, Tomsk State Un. of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Lenin Ave. 40, 634050, Tomsk, e-mail: zhechev75@gmail.com.*

Г.К. Усков, С.Е. Нескородов, Д.П. Кондратьев, А.Ю. Болгов

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФРАКТАЛЬНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

*Рассматриваются симметричные излучатели, основанные на различных типах фрактальных кривых 1-го и 2-го порядка. Представлены характеристики, полученные путем моделирования, а именно частота собственного резонанса и относительная ширина спектра. Результаты исследования можно использовать для уменьшения линейных размеров излучателей и в некоторых случаях для увеличения полосы пропускания.*

**Ключевые слова:** *самоподобные структуры, линейные фрактальные излучающие структуры, фрактальные излучатели, ультракороткие волны*

Развитие современных систем связи невозможно без улучшения характеристик антенн. Для УКВ-диапазона существенным фактором является геометрия излучателя, так как антенна может достигать размера в несколько метров. Поэтому уменьшение линейных размеров излучателей при сохранении характеристик представляет важное направление в антенной технике. Один из вариантов миниатюризации – использование фрактальных структур, хотя они в большей степени применяются в печатном исполнении для СВЧ-диапазона [1, 2].

В данной работе представлены результаты моделирования симметричных излучателей, основанных на различных типах фрактальных кривых [3]. Длина плеча всех кривых составляет 700 мм, в качестве эталона для сравнения служит симметричный вибратор с длиной плеча 700 мм и резонансной частотой 100 МГц. Толщина проводника во всех случаях 6 мм. Общий вид исследуемых излучателей представлен на рисунке 1.

В таблице 1 приведены результаты моделирования. Ширина спектра определялась по уровню коэффициента отражения  $S_{11}$  минус 5 дБ и минус 10 дБ, относительная ширина спектра – как отношение разницы между верхней и нижней частотой по выбранному уровню к резонансной частоте. Видно, что во всех случаях резонансная частота уменьшилась, лучший результат показал излучатель на основе кривой Минковского, уменьшение составило 37 % и 53 % для 1-й итерации и 2-й итерации соответственно. При этом относительная ширина спектра снизилась более чем в два раза независимо от нормирования. Излучатель на основе кривой типа «дерево» незначительно увеличил полосу пропускания, снизив при этом резонансную частоту на 31 %. Первая

и вторая итерации этой кривой имеют малые отличия при значительном усложнении конструкции. Излучатели на основе кривых Мура, Коха и Гильберта [4] уступают вышеописанным.

Таким образом, фрактальные излучатели при одинаковой апертуре с симметричным вибратором имеют более низкую резонансную частоту. Помимо этого, в отдельных случаях, например для излучателя на основе кривой типа «дерево», использование самоподобных структур несколько увеличивает полосу пропускания. Для всех описанных структур сохраняется закономерность: чем больше снижается резонансная частота, тем сильнее уменьшается полоса пропускания, что в целом соответствует общим принципам миниатюризации антенн.

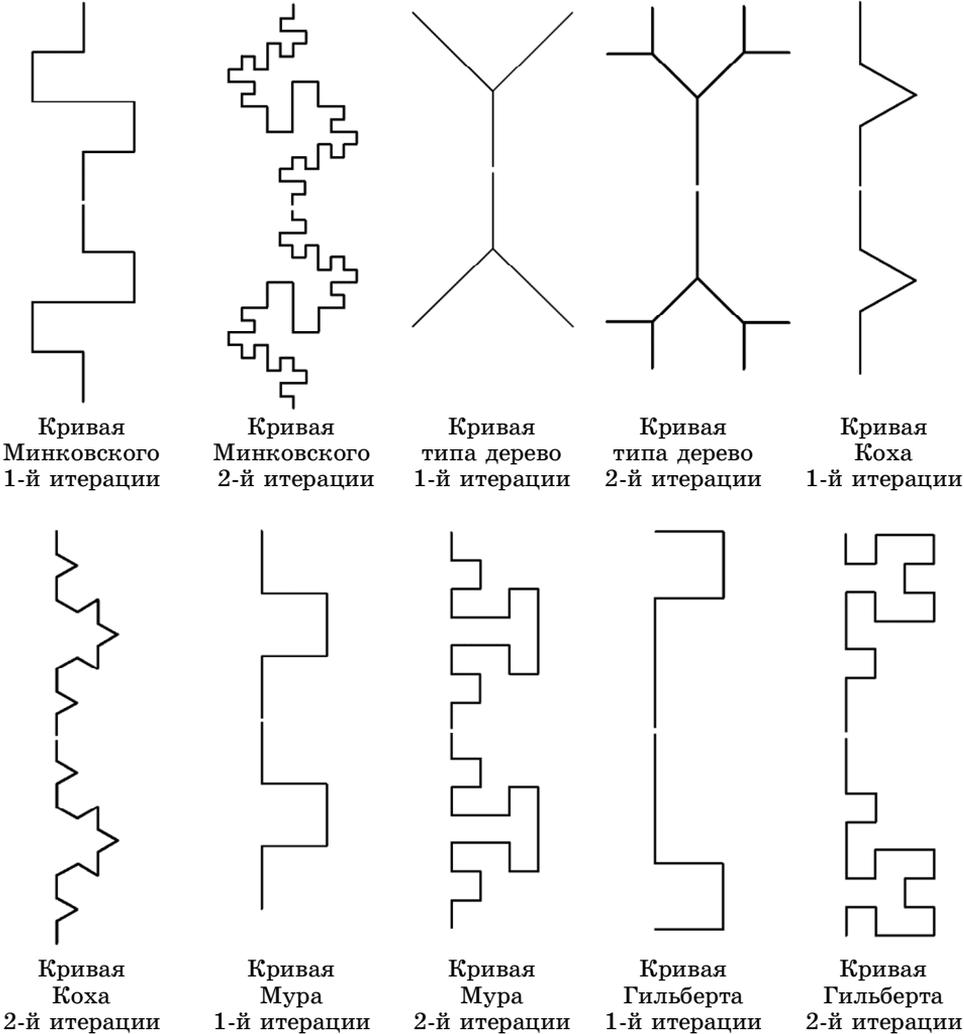


Рисунок 1 – Общий вид исследуемых излучателей

Таблица 1 – Сравнение характеристик излучателей, основанных на различных кривых

Тип излучателя	Итерация	Собственный резонанс, МГц	Собственное сопротивление, Ом	Относительная ширина спектра относительно уровня –5 дБ		Относительная ширина спектра относительно уровня –10 дБ	
				Нормирование на 50 Ом	Нормирование на собственное сопротивление	Нормирование на 50 Ом	Нормирование на собственное сопротивление
Сим. вибратор	0	100	69,6	0,173	0,22	0,074	0,105
Кривая Мин-ковского	1	63	26,6	0,078	0,079	0,041	0,041
	2	47	15,8	0,030	0,045	–	0,036
Кривая типа «дерево»	1	69	44	0,177	0,165	0,084	0,080
	2	67	39	0,168	0,154	0,082	0,077
Кривая Кюха	1	85	52,7	0,158	0,162	0,078	0,081
	2	76	41,4	0,138	0,126	0,066	0,063
Кривая Мура	1	71	35	0,116	0,107	0,054	0,055
	2	51	19	0,06	0,06	–	–
Кривая Гильберта	1	68	46,9	0,137	0,132	0,068	0,068
	2	50	27,0	0,082	0,074	–	0,040

### Список использованной литературы

1. Слюсар В. Фрактальные антенны, принципиально новый тип «ломаных» антенн. М. : Связь, 2007. Ч. 2. 8 с.
2. A Novel Fractal Rectangular Curve Printed Monopole Antenna for Portable Terminals / G. Tsachtsiris, M. Karaboikis, C. Soras [et al.] // URSI International Symposium on Electromagnetic Theory. Pisa, Italy. May 23–27, 2004.

3. Фрактальные антенны. Широкополосные беспроводные сети передачи информации / В.И. Слюсар, В.М. Вишневецкий, А.И. Ляхов [и др.]. М. : Техносфера, 2005. С. 529–542.

4. CrossPolarization, and Feed-Point Characteristics of Matched Hilbert Antennas / J. Zhu, A. Hoorfar, N. Engheta Bandwidth // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2003. V. 2. P. 2–5.

---

*Усков Григорий Константинович – д-р физ.-мат. наук, доцент, каф. электроники, Воронежский гос. ун-т, 394018, г. Воронеж, Университетская пл. 1, e-mail: Uskov@phys.vsu.ru.*

*Нескородов Станислав Евгеньевич – ассистент, каф. электроники, Воронежский гос. ун-т, 394018, г. Воронеж, Университетская пл. 1, ведущий конструктор АО «Концерн «Созвездие», e-mail: neskorodov93@mail.ru.*

*Кондратьев Денис Павлович – аспирант, каф. электроники, Воронежский гос. ун-т, 394018, г. Воронеж, Университетская пл. 1, конструктор АО «Концерн «Созвездие», e-mail: kondratiev@phys.vsu.ru.*

*Болгов Артем Юрьевич – студент, каф. электроники, Воронежский гос. ун-т, 394018, г. Воронеж, Университетская пл. 1, e-mail: bolgovart@yandex.ru.*

#### INVESTIGATION OF FRACTAL RADIATORS

*The paper deals with symmetric radiators based on different types of 1st and 2nd order fractal curves. The characteristics obtained by modeling, namely the natural resonance frequency and the relative width of the spectrum, are shown. The data obtained can be used to reduce the linear dimensions of the emitters, and in some cases to increase the bandwidth.*

**Keywords:** *self-similar structures, linear fractal radiating structures, fractal radiators, ultrashort waves*

*Uskov Grigory Konstantinovich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Electronics Department, Voronezh State University, 394018, Voronezh, University Pl. 1, e-mail: Uskov@phys.vsu.ru.*

*Neskorodov Stanislav Evgenyevich – assistant, Electronics Department, Voronezh State University, Voronezh, 394018, Voronezh, University Pl., Constructor of JSC Concern Sozvezdie. 1, e-mail: neskorodov93@mail.ru.*

*Kondratyev Denis Pavlovich – postgraduate student, Electronics Department, Voronezh State University, 394018, Voronezh, University Pl., Constructor of JSC Concern Sozvezdie. 1, e-mail: kondratiev@phys.vsu.ru.*

*Bolgov Artem Yuryevich – student, Electronics Department, Voronezh State University, Voronezh, 394018, Voronezh, University Pl. 1, e-mail: bolgovart@yandex.ru.*

Д.В. Лосев, Д.С. Бардашов, А.Г. Быков

## РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В НЕЛИНЕЙНЫХ СРЕДАХ С УЧЕТОМ ВЕКТОРНОЙ СТРУКТУРЫ ПОЛЯ

*Рассматривается задача о преобразовании формы сигнала в процессе взаимодействия волны с непрерывной нелинейной средой. Предложен метод, основанный на варьировании характеристик волны, распространяющейся в линейной среде, который не приводит к появлению секулярных членов, что обеспечивает равномерное приближение к точному решению. Результаты имеют важное фундаментальное и прикладное значение для создания излучения с заданными характеристиками и исследования структуры различных сред на основе нелинейных эффектов.*

**Ключевые слова:** нелинейные среды, распространение волн, метод вариации параметров

**Введение.** С развитием технических возможностей по созданию генераторов высокоомощного и сверхширокополосного излучения стали актуальными задачи описания распространения излучения в сплошной нелинейной среде. Среди них выделим проблему использования эффектов, возникающих при взаимодействии излучения с биологическими тканями, для своевременной диагностики различных заболеваний [1, 2]. К классу обратных задач относится проблема оптимизации сигнала за счет обогащения его спектра при распространении в нелинейной среде, пока сводящаяся к локации нелинейных включений [3].

Математически задачи анализа преобразования сигнала в нелинейных средах сводятся к решению нелинейных дифференциальных уравнений с частными производными, теория которых, за исключением простейших случаев, практически отсутствует. Поэтому при описании процессов в нелинейной среде доминирует своеобразный аналог метода комплексных амплитуд, в котором используется оценка параметров сигнала на кратных основной гармонике частотах, выбираемых по виду нелинейной характеристики исходя из физических представлений [4]. Ограниченность такого подхода видна, например, в случае облучения полупроводникового диода [5]. Большинство подобных подходов представляет собой попытку решения однородных уравнений, т.е. описание возможных типов колебаний, конкретное сочетание которых задается видом источника. Такая трактовка возможна для линейных уравнений, но в случае нелинейных сред, для которых принцип суперпозиции несправедлив, вызывает большие сомнения.

В данной работе делается попытка решения задачи о распространении излучения источника в виде диполя в нелинейной среде, свободного от указанных выше недостатков.

**Метод вариации параметров.** Для решения уравнений Максвелла в случае нелинейной среды применим метод вариации параметров [6]. В качестве исходной формы выберем решение для линейной непроводящей однородной среды при воздействии электрического диполя  $j_z = \varphi(t) \delta(x - x_0) \delta(y - y_0) \delta(z - z_0)$ . Будем варьировать амплитуду и время запаздывания составляющих полей. В результате решение системы уравнений Максвелла при нелинейной зависимости диэлектрической проницаемости от величины приложенного поля будем искать в виде

$$D_x = \frac{\partial^2}{\partial x \partial z} [(m_4 \varphi(\tau)) \chi(\tau)]; \quad H_x = \frac{\partial}{\partial y} [(m_1 \varphi(\tau)) \chi(\tau)];$$

$$D_y = \frac{\partial^2}{\partial y \partial z} [(m_5 \varphi(\tau)) \chi(\tau)]; \quad H_y = -\frac{\partial}{\partial x} [(m_2 \varphi(\tau)) \chi(\tau)];$$

$$D_z = \frac{\partial^2}{\partial z^2} [(m_6 \varphi(\tau)) \chi(\tau)] - \mu_a \varepsilon_a \frac{\partial}{\partial t} [(m_6 \varphi(\tau)) \chi(\tau)]; \quad H_z = 0,$$

где функции  $m_{1,2,4,5,6}(\vec{r}, t)$  имеют физический смысл коэффициентов прохождения волны в нелинейной среде; функция  $\tau(\vec{r}, t)$  описывает запаздывание волны при распространении за счет изменения ее фазовой скорости нелинейной средой;  $\chi$  – функция Хевисайда. Подчеркнем, что взаимосвязь между этими функциями в большой степени произвольна, но отражает основные представления об изменениях характеристик волны при распространении в линейной однородной среде и надежду на адекватное описание процессов в нелинейной среде.

Подставляя эти выражения в систему уравнений Максвелла и приравнявая коэффициенты при  $\delta'(\tau)$ , получаем систему уравнений

$$m_2 = m_4 \tau_t; \quad m_1 = m_5 \tau_t; \quad -m_2 \tau_x^2 - m_1 \tau_y^2 = m_6 (\tau_t \tau_z^2 - \mu_a \varepsilon_a \tau_t^2).$$

Здесь и далее для упрощения выражений используются нижние индексы для обозначения соответствующих производных, например  $\tau_x \equiv \partial \tau / \partial x$ ,  $m_{tt} \equiv \partial^2 m / \partial t^2$ . Обозначение  $\varphi'$  означает производную по всему аргументу.

Поскольку точное решение этой системы невозможно из-за превышения количества неизвестных над количеством уравнений, будем

решать ее в предположении малого отличия сигнала от случая его распространения в линейной среде. Поэтому, подобно методу геометрической оптики, будем считать приоритетными фазовые соотношения и приближенно примем  $m_i = 1/4\pi R$ . Тогда последняя система приводит к уравнению

$$\tau_x^2 + \tau_y^2 + \tau_z^2 = \mu_a \varepsilon_a, \quad (1)$$

где  $\tau_i = 1$ .

Форма уравнения (1) совпадает с известным уравнением эйконала в приближении геометрической оптики, однако важным отличием является зависимость  $\varepsilon_a$  от задержки  $\tau(\vec{r}, t)$ . Рассмотрим случай, когда нелинейная зависимость  $\varepsilon_a$  определяется уровнем воздействующей на среду энергии  $W$ :

$$\mu_a \varepsilon_a = \frac{1}{v^2} (1 + \gamma f(W)),$$

где  $v$  – скорость распространения волны в фоновой линейной среде;  $\gamma$  – малый числовой параметр, характеризующий влияние нелинейности среды  $f$ .

**Вычисление функции  $\tau(\vec{r}, t)$ .** Применим для решения уравнения (1) метод Пфаффа [7]. В качестве дополнительных условий используем предельные случаи линейной и квазилинейной среды. Тогда в первом приближении фазовая характеристика может быть вычислена по формуле

$$\tau = t - \int_0^R \sqrt{\mu_a \varepsilon_a} dR.$$

Основным препятствием для определения этой функции является ее зависимость от величины поля (или его плотности энергии) на протяжении всего пути распространения сигнала от источника до точки приема. В то же время проблема правильного нахождения характеристик электромагнитного поля вблизи источника представляет собой сложную задачу, связанную с особенностью поля точечного источника при  $R \rightarrow 0$ . Таким образом, значения напряженностей полей в непосредственной близости от излучателя неверны, а следовательно, необходим более тонкий анализ величин этих полей.

Попытка решения указанной проблемы изложена в [8]. Выражение для плотности энергии, свободное от особенностей, имеет вид

$$W = \frac{1}{2\varepsilon_a} \left[ D_x^2 + D_y^2 + D_z^2 + \frac{1}{v^2} (H_x^2 + H_y^2 + H_z^2) \right] =$$

$$= \frac{\chi(t - R/v) I^2 \sin^2 \theta}{2(4\pi)^2 \varepsilon_a} \left[ \left( \frac{\varphi'}{v^2} \right)^2 + \left( \frac{\varphi'}{v^2} + \frac{\varphi}{vR} \right)^2 \right],$$

где

$$I \approx \pi a^2 \ln \left| \frac{\sqrt{a^2 + \rho^2 + \left( \frac{h}{2} - z \right)^2} + \frac{h}{2} - z}{\sqrt{a^2 + \rho^2 + \left( \frac{h}{2} + z \right)^2} - \frac{h}{2} - z} \right|;$$

$h$  и  $a$  – длина и радиус поперечного сечения диполя соответственно;  
 $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$ .

**Амплитудные характеристики электромагнитного поля.** Система уравнений для амплитудных функций  $m_i(\vec{r}, t)$ ,  $i = 1, 2, \dots, 6$ , получается приравниванием коэффициентов при  $\delta(\tau(\vec{r}, t))$  в уравнениях Максвелла. В результате преобразований она сводится к системе интегродифференциальных уравнений

$$m_1 = m_2; \quad m_4 = m_5; \quad m_1 \Phi = \frac{\partial}{\partial t} (m_4 \Phi);$$

$$m_4 \Phi = m_6 \Phi - \frac{1}{2v} \int_0^t d\tau \int_{z-v(t-\tau)}^{z+v(t-\tau)} \frac{\partial}{\partial \tau} \left( \frac{\partial m_6}{\partial \tau} \Phi \right) d\zeta,$$

$$m_6 \Phi = \frac{v}{2} \int_0^t d\tau \int_{z-v(t-\tau)}^{z+v(t-\tau)} \left[ \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left( \rho \frac{\partial}{\partial \rho} \int_0^t m_1 \Phi dt \right) + \frac{1}{v^2} \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial m_6}{\partial t} \Phi \right) \right] d\zeta,$$

которую предполагается решать итерационно.

Поскольку в полученную систему уравнений явно не входит нелинейная характеристика, то ее решение приведет к функциям, соответствующим линейному случаю. Отсюда следует вывод, что влияние нелинейной среды на амплитудные характеристики составляющих электромагнитного поля есть величина второго порядка малости и в первом приближении этим влиянием можно пренебречь.

**Заключение.** Решение системы уравнений Максвелла для нелинейной среды получено методом вариации параметров полей линейной задачи. Элементарность используемого источника излучения дает возможность определить неизвестные функции из условий равенства

коэффициентов при  $\delta$ -функции и ее производной. Несмотря на сложность задачи, что ведет к неизбежным приближениям, используемый подход позволяет выявить эффекты накопления изменений амплитудных, фазовых и поляризационных характеристик сигнала при распространении волны в нелинейной среде. Этим он выгодно отличается от классических методов, основанных на использовании метода малых возмущений, результаты которых справедливы только в ближней зоне источника, где и сама структура воздействующего сигнала требует корректировки.

### Список использованной литературы

1. Нелинейные электромагнитные волны / под ред. П. Усленги. М. : Мир, 1983. 312 с.
2. Ходжкин А. Нервный импульс. М. : Мир, 1965. 128 с.
3. Якубов В.П., Лосев Д.В., Мальцев А.И. Диагностика нелинейностей по возмущениям рассеянного поля // Известия вузов. Радиофизика. 2000. Т. 43, № 7. С. 645–651.
4. Виноградова М.Б., Руденко О.В., Сухоруков А.П. Теория волн. М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1979. 384 с.
5. Быков А.Г., Лосев Д.В., Бардашов Д.С. Возбуждение полупроводникового диода коротким импульсом // Известия вузов. Физика, 2015. Т. 58, № 8-2. С. 147–150.
6. Лосев Д.В., Бардашов Д.С., Быков А.Г. Метод вариации параметров в задаче распространения волн в нелинейных средах // Журнал радиоэлектроники (электронный журнал). 2017. № 2. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/feb17/13/text.pdf>.
7. Демидов С.С. К истории теории дифференциальных уравнений с частными производными первого порядка. Работы И. Ф. Пфаффа и О. Коши // Историко-математические исследования. М. : Наука, 1979. Вып. 24. С. 191–217.
8. Быков А.Г., Лосев Д.В., Бардашов Д.С. Электромагнитное поле элементарного излучателя в ближней зоне // Электроника и микроэлектроника СВЧ. 2017. Т. 1. С. 390–394.

---

*Лосев Дмитрий Витальевич – канд. физ.-мат. наук, доцент, каф. радиофизики, Томск. гос. ун-т, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, e-mail: l-kaf@mail2000.ru.*

*Бардашов Дмитрий Сергеевич – ст. преподаватель, каф. радиофизики, Томск. гос. ун-т, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, e-mail: darkness@mail2000.ru.*

*Быков Александр Геннадьевич – магистрант, каф. радиофизики, Томск. гос. ун-т, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, e-mail: dexmor025@gmail.com.*

**PROPAGATION OF ELECTROMAGNETIC WAVES  
IN NONLINEAR MEDIA CONSIDERING  
THE VECTOR FIELD STRUCTURE**

*The paper considers the problem of signal shape transformation during the wave interaction with a continuous nonlinear medium. The proposed method, based on varying the characteristics of a wave in a linear medium, does not lead to the appearance of secular terms, thereby providing a uniform approximation to the exact solution. The results are of great fundamental and applied importance for the creation of radiation with desired characteristics and the study of the structure of various media based on nonlinear effects.*

**Keywords:** *nonlinear media, wave propagation, parameter variation method*

*Losev Dmitry Vitalievich – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Docent, Radiophysics Department, Tomsk State University, 634050, Tomsk, Lenin Av., 36, e-mail: l-kaf@mail2000.ru.*

*Bardashov Dmitry Sergeevich – Senior Lecturer, Radiophysics Department, Tomsk State University, 634050, Tomsk, Lenin Av., 36, e-mail: darkness@mail2000.ru.*

*Bykov Alexander Gennadievich – undergraduate student, Radiophysics Department, Tomsk State University, 634050, Tomsk, Lenin Av., 36, e-mail: dexmor025@gmail.com.*

И.С. Гогадзе

## ВОССТАНОВЛЕНИЕ И ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ВЛАЖНОСТИ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА С ПОМОЩЬЮ ЗЕНИТНОЙ ТРОПОСФЕРНОЙ ЗАДЕРЖКИ ПРИ ПРОСТРАНСТВЕННОМ РАЗНЕСЕНИИ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ И НАВИГАЦИОННОЙ СТАНЦИЙ

*Представлены результаты анализа восстановления параметров влажности воздуха для удаленной от навигационной станции местности с помощью сигналов, принятых со спутников глобальной навигационной системы. Восстановлены такие параметры, как интегральное влагосодержание, абсолютная и относительная влажность. Результаты анализа показали значения корреляции порядка 0,85, за исключением параметров относительной влажности.*

**Ключевые слова:** интегральное влагосодержание, тропосферная задержка, абсолютная влажность, относительная влажность

**Введение.** Влажная составляющая задержки сигнала определяется влагосодержанием тропосферы. В тропосфере массы воды и водяного пара распределены нерегулярно, что затрудняет описание высотного профиля влажности детерминированными моделями. Вследствие этого при высокоточных навигационных или геодезических измерениях влажная составляющая является основным источником ошибки при компенсации тропосферной задержки сигнала несмотря на то, что на неё приходится всего 10% общей задержки [1].

Для получения дифференциальных поправок тропосферной задержки используются базовые станции спутниковой системы навигации (GPS), которые выдают готовые решения зенитной тропосферной задержки, но таких станций на территории Российской Федерации мало, следовательно, необходимо найти возможность применения таких поправок для определения влагосодержания тропосферы на участках, удаленных от станций GPS.

Эталонными данными служили значения зенитной тропосферной задержки сигнала с навигационной станции, находящейся в Новосибирске. Точность таких данных составляет 4 мм. Метеорологическими данными являлись приземные погодные значения с метеостанции АМК-03, расположенной на полигоне НИИ РТС ТУСУРа. Пространственное разнесение между этими пунктами составляет более 200 км.

Восстановление интегрального влагосодержания производилось по методике, описанной в работе [2]. Результаты моделирования приведены на рисунке 1.

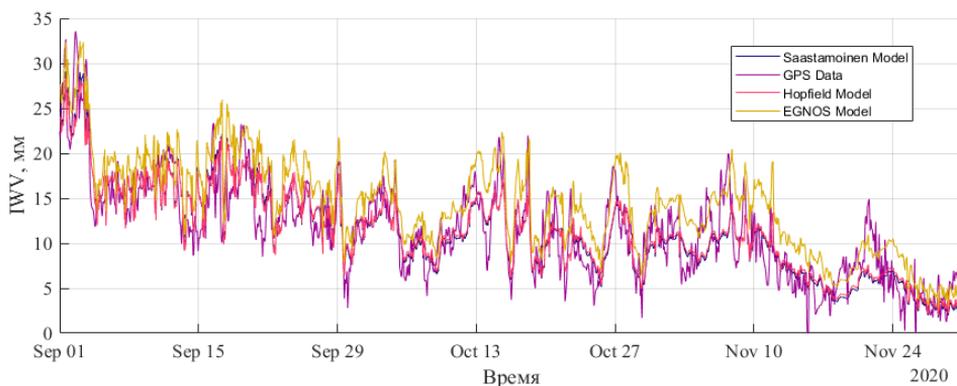


Рисунок 1 – Сравнение интегрального влагосодержания, полученного по навигационным данным и данным моделей

Восстановление абсолютной влажности по сигналам спутниковой системы навигации производилось по формуле Клапейрона – Менделеева

$$e = ZWD \frac{439,17 T_S}{1255 + 0,05 T_S},$$

где ZWD – «влажная» составляющая зенитной тропосферной задержки;  $T_S$  – температура воздуха, К.

По полученным результатам построен график (рисунок 2), при этом коэффициент корреляции составил 0,83, что достаточно для предварительной оценки абсолютной влажности на местности.

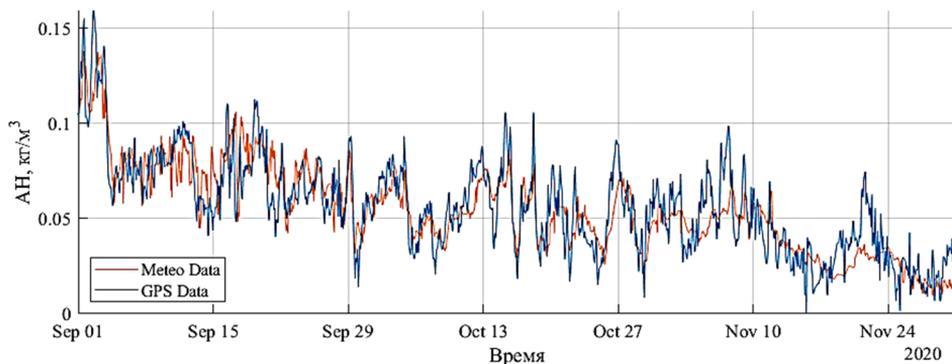


Рисунок 2 – Сравнение абсолютной влажности, полученной по метеорологическим и эмпирическим данным

Восстановление относительной влажности по сигналам спутниковой системы навигации производилось по формуле

$$RH = \frac{e}{6,112 \exp \left[ \frac{17,62 t_s}{243,12 + t_s} \right]} \cdot 100\%,$$

где  $e$  – парциальное давление паров воды;  $t_s$  – температура воздуха, °С.

Результаты представлены на рисунке 3 как разность метеорологических и смоделированных данных. При этом коэффициент корреляции составил 0,61. Такое сильное расхождение можно объяснить тем, что наземные метеорологические станции измеряют влажность на высоте 1,5 м над землей. При этом определяют относительную влажность воздуха как отношение фактической абсолютной влажности к абсолютной влажности для состояния насыщения при той же температуре [3]. Тропосферная задержка снимается по всей трассе распространения радиоволн, что также может приводить к расхождениям в значениях влажности. Кроме того, сказывается неточность самой модели восстановления относительной влажности.

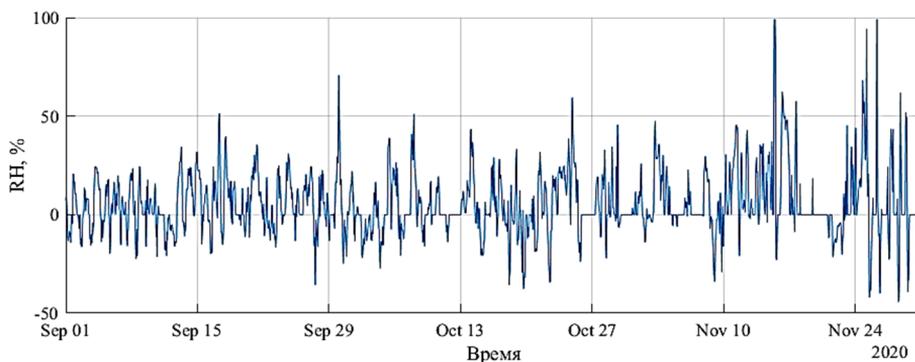


Рисунок 3 – Сравнение относительной влажности, полученной по метеорологическим и эмпирическим данным

Таким образом, восстановление параметров влажности по сигналам глобальной навигационной спутниковой системы позволяет получить предварительные оценки абсолютной влажности, однако восстановление относительной влажности имеет низкие показатели корреляции.

### Список использованной литературы

1. Першин Д.Ю. // Вестник НГУ. Информационные технологии. 2009. Т. 7, № 1. С. 84–91.
2. Калинин В.В. Восстановление интегрального влагосодержания атмосферы с помощью глобальных навигационных спутниковых систем : дис. ... канд. физ.-мат. наук. Казань : Казанский федеральный университет, 2013. 121 с.

3. Расписание погоды : сайт RP5. URL: <https://rp5.ru/docs/descript/ru#6>.

---

*Гогадзе Илья Сергеевич – студент 6-го курса группы 128, Томский гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 634045, Россия, г. Томск, ул. Вершинина, 72, e-mail: Ilya.Gogadze@yandex.ru.*

**RECOVERING AND ESTIMATING ATMOSPHERIC HUMIDITY  
PARAMETERS USING ZENITH TROPOSPHERIC DELAY  
WHEN METEOROLOGICAL AND NAVIGATION STATIONS  
ARE SEPARATED**

*The paper analyzes the recovery of air humidity parameters in a remote area using signals from global navigation system satellites. The recovered parameters include integral moisture content, absolute humidity, and relative humidity. The correlation values for all parameters were around 0,85, except for the relative humidity parameters.*

**Keywords:** *Integral moisture content, Global Navigation Satellite System (GNSS), tropospheric delay, absolute humidity, relative humidity*

*Gogadze Ilya Sergeevich – student of 6 course of group 128, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 634045, Russia, Tomsk, Vershinina str. 72, e-mail: Ilya.Gogadze@yandex.ru.*

**УДК 621.376**

**И.В. Аржевикин**

**АЛГОРИТМ КОМБИНИРОВАННОГО ТИПА  
ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ СВОБОДНЫХ УЧАСТКОВ РАДИОДИАПАЗОНА  
ПРИ РАБОТЕ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ**

*Рассмотрены различные алгоритмы обнаружения свободных частот в радиочастотном спектре, основанные на принципах когнитивного радио. Проведен анализ недостатков существующих алгоритмов и показана необходимость в разработке более универсального алгоритма обнаружения свободных частот. Представлена модификация непараметрического алгоритма на основе модифицированного критерия Вилкоксона, имеющего недостаток в виде отсутствия возможности работать с узкополосными сигналами. Выполнен анализ работы алгоритма с сигналами цифровых видов модуляции. Продемонстрировано преимущество разработанного алгоритма по сравнению с точечным алгоритмом и алгоритмом на основе критерия Вилкоксона.*

*Ключевые слова: комбинированный алгоритм, критерий Вилкоксона, средний уровень сигнала, метод конформного отображения*

**Введение.** В настоящее время наблюдается бурное развитие различных систем передачи данных. Большими темпами меняются требования к скорости и объему передаваемой информации.

При создании таких систем основной упор делается на применение широкополосных каналов связи. В такой ситуации для расширения пользовательских сетей возрастает потребность в эффективном использовании радиочастотного спектра. Для этого существует разделение полос частот среди операторов связи. Операторы используют только полосы, которые закреплены за ними. Диапазон частот является ограниченным ресурсом. Один из способов выхода из данной ситуации – применение принципов когнитивного радио.

Когнитивное радио (КР) – это беспроводная интеллектуальная система связи, способная анализировать окружающую обстановку и приспосабливаться к ней посредством обучения, реагируя на изменения в окружении изменением собственных параметров (например, несущей частоты, мощности, способа модуляции) в реальном времени с целью увеличения эффективности использования спектрального ресурса [1]. Главным преимуществом систем с применением когнитивного радио является возможность обнаруживать и использовать диапазоны частот, которые в нужный момент времени свободны. Однако в КР существует проблема обнаружения сигналов, связанная с недостаточным количеством априорных данных или их отсутствием. Решить эту проблему возможно, применив адаптивные алгоритмы обнаружения. Существующие алгоритмы предполагают работу только с определенным типом сигналов и не позволяют одновременно обрабатывать сигналы нескольких источников радиоионизлучения. Таким образом, необходим алгоритм обнаружения, способный точно определять свободные диапазоны частот во всем доступном радиочастотном диапазоне.

**1. Обзор алгоритмов для обнаружения радиосигналов неопределенной формы в широком и узком диапазонах частот.** Существующие непараметрические алгоритмы на основе модифицированного критерия Вилкоксона имеют довольно высокую эффективность обнаружения в сравнении с распространенным точечным алгоритмом, но только при работе с относительно широкополосными сигналами, а именно с шириной полосы более 32 отсчетов ДПФ [2]. Дело в том, что анализ спектра в когнитивном радио осуществляется чаще всего в довольно широких диапазонах частот и, кроме того, имеется большое количество разнообразных источников, работающих одновременно в различных диапазонах частот и занимающих ширину спектра от нескольких килоггерц до мегагерц. В таких ситуациях частотный анализ о месте нахождения их

в частотном спектре становится довольно трудной задачей. При расположении узкополосных и широкополосных сигналов в анализируемом диапазоне необходимо использовать комбинированный алгоритм, который будет иметь большую эффективность обнаружения во всем диапазоне частот. Решением данной проблемы может служить улучшение существующего непараметрического алгоритма для обнаружения узкополосных сигналов.

Принцип работы точечного алгоритма заключается в принятии решения по каждому спектральному коэффициенту наблюдаемого процесса отдельно, а в непараметрических алгоритмах решение об обнаружении принимается в результате анализа нескольких спектральных отсчетов. При этом ширина интервала соответствует наименьшей ожидаемой полосе сигнала. На рисунке 1 приведена схема точечного алгоритма, эффективного для обнаружения узкополосных сигналов, а на рисунке 2 – непараметрического, эффективного при работе с широкополосными сигналами.

Видим общую для двух алгоритмов оценку уровня шума и одинаковую методику получения спектрограмм. Для точечного алгоритма дальнейшие действия заключаются в расчете порога, который сравнивается с каждым спектральным отсчетом. Следовательно, можно усовершенствовать существующий непараметрический алгоритм посредством комбинирования с точечным (рисунок 3).

Основная идея предлагаемого алгоритма состоит в том, что занятые участки радиочастотного спектра формируются на основе данных непараметрического и точечного алгоритмов. Используются преимущества каждого из двух алгоритмов, что позволяет исключить недостатки, имеющие место в случае применения каждого из них по отдельности [3]. Разработанный алгоритм способен обнаруживать узкополосные сигналы с числом отсчетов от 1 до 32 и широкополосные сигналы, которые имеют число отсчетов более 32. Это приводит к небольшому увеличению вычислительной сложности, но в связи с активным развитием вычислительной техники в настоящее время данный аспект не является проблемой. Для корректной работы комбинированного алгоритма необходимо ввести дополнительную операцию – расчет порога обнаружения сигналов [4]:

$$x_{\text{пор}}(\sigma_{\xi}^2) = \frac{\sigma_{\xi}^2}{N} - \left( 1 - \frac{1}{9R} x_{\xi} \left( \sqrt{\frac{1}{9R}} \right)^3 \right), \quad (1)$$

где  $x_{\xi}$  – процентная точка гауссовского распределения;  $\sigma_{\xi}^2$  – интенсивность шума.



Рисунок 1 – Схема точечного алгоритма

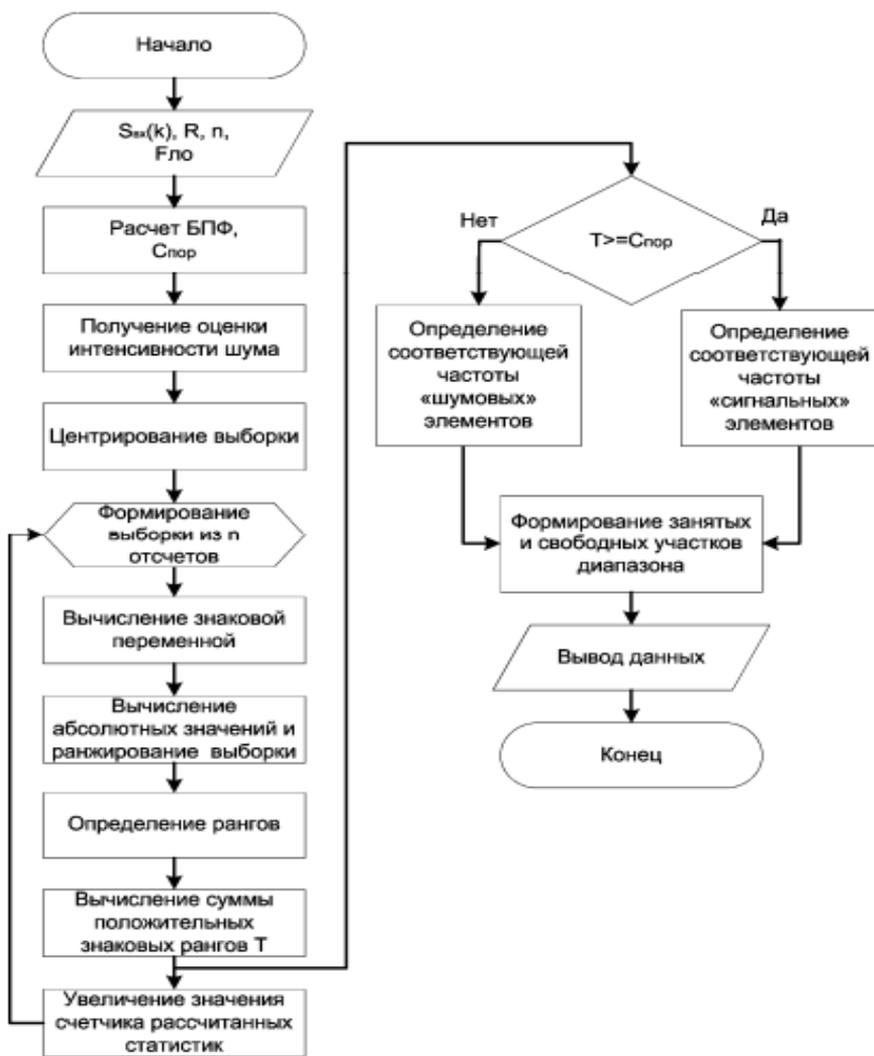


Рисунок 2 – Схема непараметрического алгоритма

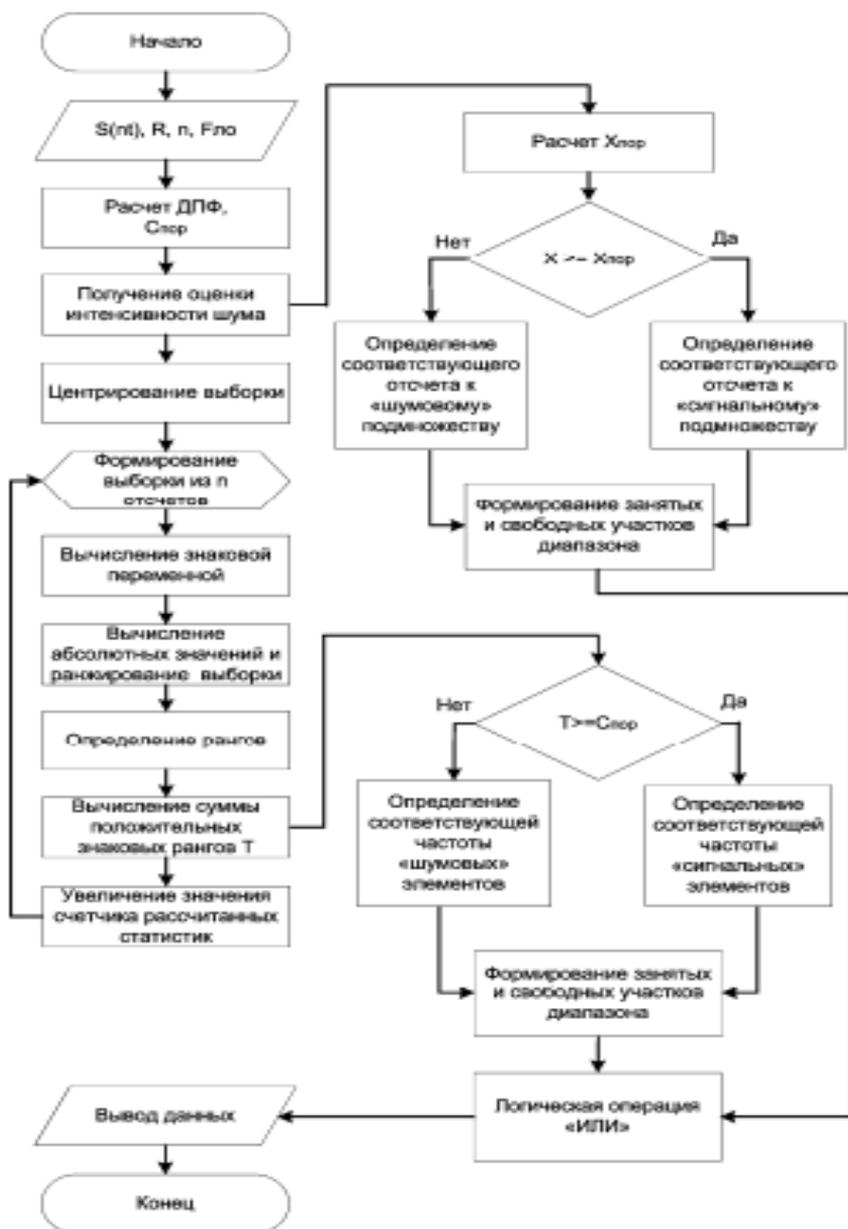


Рисунок 3 – Схема комбинированного алгоритма для обнаружения свободных участков радиодиапазона

**2. Анализ работы комбинированного алгоритма.** Данный алгоритм обнаружения сигналов предназначен для мониторинга спектра в когнитивном радио.

Для демонстрации преимуществ алгоритма проведен процесс моделирования и расчет характеристик обнаружения.

Чтобы сравнить разработанный алгоритм обнаружения с точечным параметрическим алгоритмом, формируем радиосигнал с модуляцией GMSK, задаем ширину полосы 200 кГц и добавляем аддитивный белый гауссовский шум (рисунок 4). Сигнал наиболее близок к сигналам стандарта GSM. Ширина полосы обзора  $\Delta F = 2$  МГц, частота несущей 1 МГц, частота дискретизации 4 МГц. Количество точек ДПФ равно 1024. Количество усреднений спектров  $R = 2$ .

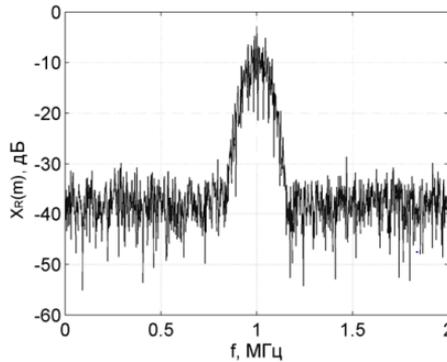


Рисунок 4 – Спектр сигнала с GMSK-модуляцией

Характеристики обнаружения для параметрического (П) и исследуемого непараметрического (Н) алгоритмов определялись в диапазоне значений параметра  $n$  (длина выборки) от 20 до 50 (рисунок 5). Как видим на рисунке, эффективность обнаружения непараметрического алгоритма выше параметрического при  $P_{обн} = 0,8$  на 6 дБ по отношению сигнал/шум (ОСШ), если же  $P_{обн} = 0,2$  и  $n = 30$ , то на 13 дБ. Проведен анализ зависимости  $P_{обн}$  (с теми же значениями ОСШ) от числа усреднений спектра  $R$  (рисунки 6 и 7).

На рисунке 6 видно, что вероятность обнаружения при отсутствии усреднения спектров существенно ниже, чем при наличии операций по усреднению спектров. Когда параметр  $R = 2$ , преимущество в пороговом ОСШ по сравнению с характеристиками без наличия усреднения при  $P_{обн} = 0,8$  равно 2 дБ, а при  $P_{обн} = 0,2$  – около 3 дБ. Если увеличивать число усреднений, то получается постоянный небольшой рост эффективности обнаружения около 1 дБ для каждого последующего значения  $R$ .

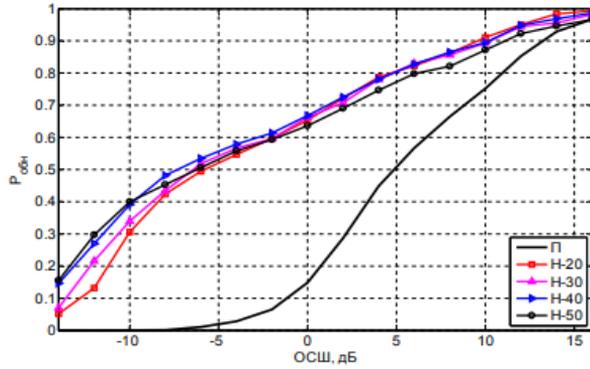


Рисунок 5 – Характеристики обнаружения сигнала с модуляцией GMSK для двух алгоритмов

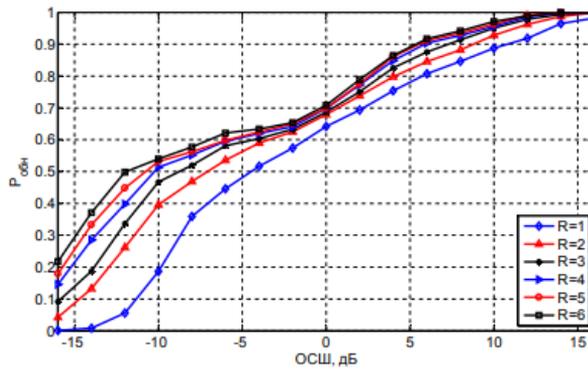


Рисунок 6 – Характеристики обнаружения сигнала с модуляцией GMSK разработанного непараметрического алгоритма с числом усредняемых спектров  $R$  в диапазоне от 1 до 6

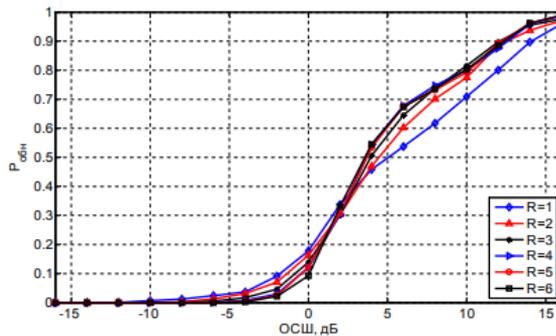


Рисунок 7 – Характеристики обнаружения сигнала с модуляцией GMSK параметрического алгоритма с числом усредняемых спектров в диапазоне  $R$  от 1 до 6

На рисунке 7 видно, что при использовании параметрического алгоритма имеет место та же тенденция, что и в случае непараметрического. Отличие только в том, что увеличение числа усредняемых спектров выше 2 не ведет к росту эффективности. При ОСШ менее 2 дБ уменьшается вероятность обнаружения. Объясняется это тем, что алгоритм обладает точечным характером обнаружения. Вероятность наличия отсчетов сигнала, превышающих порог, расчет которого проводился для данного значения ОСШ, уменьшается с ростом числа усреднений спектра.

**Заключение.** Комбинированный алгоритм показывает на 1–15 дБ большую эффективность обнаружения по сравнению с параметрическим в отношении сигнал/шум, когда значение ОСШ находится в диапазоне от минус 15 до 15 дБ. Это приемлемо для сигналов современных стандартов связи с различными статистическими характеристиками.

### Список использованной литературы

1. Haykin S. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications // Selected Areas in Communications, IEEE Journal. 2005. V. 23. P. 201–202.

2. Богданович В.А. Бородич Ё.Ю. Построение инвариантного алгоритма обнаружения сигналов в частотной области на основе критерия согласия // Доклады АН ВШ РФ. 2010. № 1(14). С. 74–83.

3. Токарев А.Б. Рекомендации по выбору параметров обработки при поиске шумовых участков диапазона частот // Радиотехника. 2012. № 2. С. 49–52.

4. Айфичер Э.С., Джервис Б.У. Цифровая обработка сигналов: практический подход. 2-е изд. М. : Вильямс, 2008. 992 с.

---

*Аржевикин Иван Викторович – аспирант, каф. конструирования и производства радиоэлектронных средств, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет», 119454, ЦФО, г. Москва, проспект Вернадского, д. 78; ivanruf-1@mail.ru.*

### **DEVELOPMENT OF A COMBINED TYPE ALGORITHM FOR DETECTING FREE AREAS OF THE RADIO BAND WHEN OPERATING IN A WIDE FREQUENCY RANGE**

*The article discusses various algorithms for detecting free frequencies in the radio frequency spectrum based on the principles of cognitive radio. The disadvantages of existing algorithms are analyzed and the need to develop a more universal algorithm for detecting free frequencies is described. The considered algorithm is capable of detecting free frequencies, which are necessary*

*in modern communications for the effective use of the radio frequency spectrum and the possibility of access to various information resources of new users, since the frequency range is a limited resource, and also has a high efficiency of dynamic detection of free frequencies throughout the analyzed range. A modification of the existing nonparametric algorithm based on the modified Wilcoxon criterion, which has the disadvantage of being unable to work specifically with narrowband signals, is presented. The analysis of the algorithm operation with digital modulation signals is performed. Prei was demonstrated*

**Keywords:** *combined algorithm, Wilcoxon criterion, average signal strength, conformal mapping method*

*Arzhevikin Ivan Victorovich – postgraduate student of the department of construction and production of radio electronic means, MIREA – Russian Technological University (RTU – MIREA), 119454, Central Federal District, Moscow, Vernadsky Avenue 78; ivanruf-1@mail.ru.*

## Секция 2. РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

УДК 621.396.67

Д.А. Лянгузов

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВХОДНОГО ИМПЕДАНСА НИЗКОПРОФИЛЬНОЙ АНТЕННЫ

*Рассматривается проблема обеспечения широкополосности низкопрофильного излучателя при сохранении приемлемых массо-габаритных характеристик возбуждающего элемента.*

**Ключевые слова:** низкопрофильная антенна, возбуждающий элемент

В качестве низкопрофильной антенны для исследования выберем простейшую круговую микрополосковую антенну, возбуждаемую по центру с помощью несимметричного вибратора (НСВ). Микрополосковые антенны не выступают за пределы объекта и малозаметны, однако в большинстве случаев являются узкополосными [1].

Для возможного расширения рабочей полосы частот исследуем зависимость активной  $X_{h/d}$  и реактивной  $R_{h/d}$  составляющих входного импеданса антенны  $R_{вх}$  для различных значений отношения высоты вибратора к его диаметру  $h/d$  от величины  $h/\lambda_n$ , где  $\lambda_n$  – длина волны для наименьшей частоты рабочего диапазона (рисунок 1).

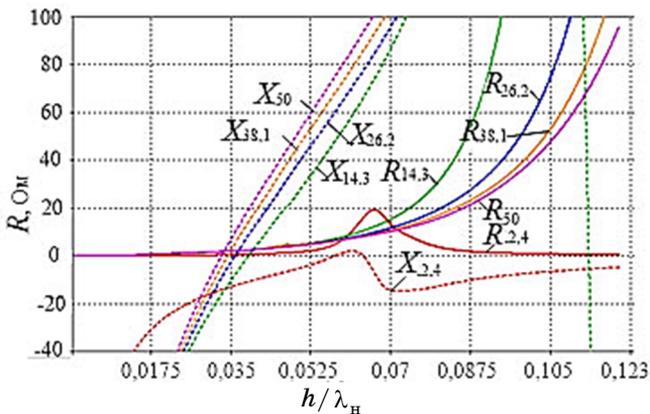


Рисунок 1 – Зависимость активной и реактивной составляющих  $R_{вх}$  вибратора от параметра  $h/\lambda_n$

При утолщении проводника вибратора резонансное значение отношения  $h / \lambda_{\text{н}}$  уменьшается, особенно для параллельного резонанса. Частотная зависимость  $R_{\text{вх}}$  вибратора выражена тем слабее, чем толще вибратор, т.е. эквивалентная добротность вибратора на частоте резонанса тем ниже, чем меньше его волновое сопротивление. Добротность цепи пропорциональна отношению запасенной электромагнитной энергии к энергии, теряемой за период высокочастотных колебаний на резонансной частоте. В случае вибратора энергия теряется на излучение, причем её расход определяется только длиной плеча и практически (в рамках синусоидального распределения тока) не зависит от толщины плеча [2]:

$$R_{\Sigma\Pi} = \frac{W_0}{4\pi} \left\{ \begin{array}{l} 2[C + \ln 2kh - Ci2kh] + \\ + \cos 2kh [C + \ln 2kh + Ci4kh - 2Ci2kh] + \\ + \sin 2kh [Si4kh - 2Si2kh] \end{array} \right\},$$

где  $C = 0,5772\dots$  – постоянная Эйлера;  $Si x = \int_0^x \frac{\sin u}{u} du$  – интегральный

синус;  $Ci x = -\int_0^x \frac{\sin u}{u} du$  – интегральный косинус.

Запасенная электромагнитная энергия сосредоточивается в непосредственной близости к проводникам вибратора и получается тем большей, чем меньше его толщина.

Другими словами, толстый вибратор не позволяет электромагнитному полю концентрироваться около его оси. Заметим, что в случае геометрического уменьшения размеров антенны входной импеданс заметно снижается [2].

Итак, чтобы добиться расширения диапазона рабочих частот, необходимо конструктивно исполнить возбуждающий НСВ как можно толще, однако это приводит к значительному увеличению массы и стоимости антенны. Таким образом, требуется найти компромиссное решение. Вариантом является конический вибратор: при определенных дополнительных конструктивных решениях его входной импеданс относительно цилиндрического изменяется незначительно, что будет показано в дальнейшем (рисунок 2).

Высоту антенны определяет в основном профиль конического НСВ. Уменьшение высоты антенны (например, для обеспечения скрытности или обтекаемости) приводит к необходимости ее электрического «удлинения», причем исследование  $R_{\text{вх}}$  (см. рисунок 1) показывает, что

в этом случае требуется компенсация как реактивной, так и индуктивной составляющей.

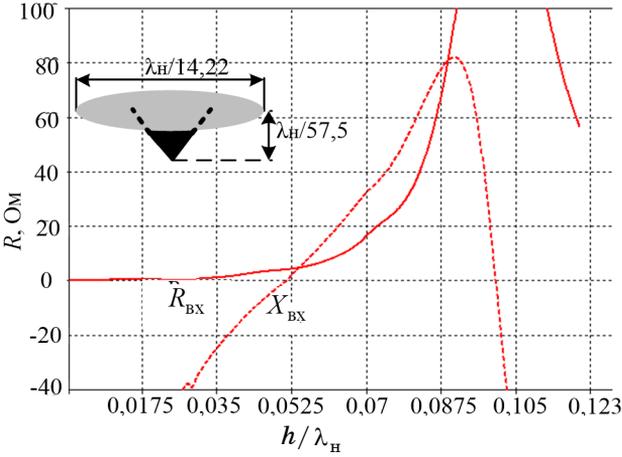


Рисунок 2 – Зависимость активной и реактивной составляющих  $R_{вх}$  вибратора от параметра  $h / \lambda_H$  при добавлении верхней емкостной нагрузки

Для создания достаточно низкопрофильной антенны (по параметру  $h / \lambda_H$ ) необходимо добавить верхнюю ёмкостную нагрузку (см. рисунок 2). С целью дополнительной компенсации емкостной составляющей в верхней части антенны делается вырез. Изменение  $R_{вх}$  при этом показано на рисунке 3.

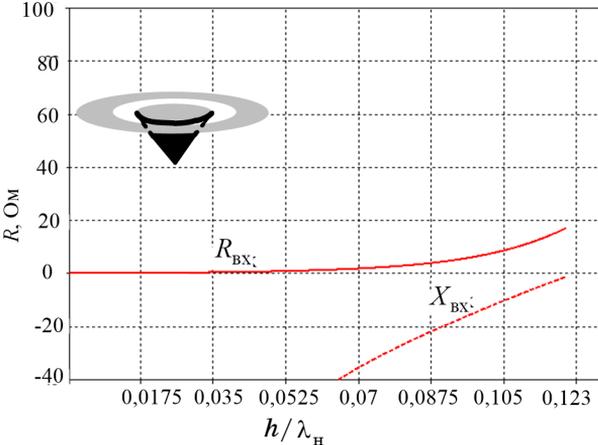


Рисунок 3 – Зависимость активной и реактивной составляющих  $R_{вх}$  вибратора от параметра  $h / \lambda_H$  при добавлении выреза в верхней емкостной нагрузке

Для лучшего согласования (увеличения «полезного объема» антенны [3]) добавлены шунты от внешней стороны емкостной нагрузки на корпус, представляющие собой индуктивность (рисунок 4). В результате такого конструктивного решения распределение значений входного импеданса антенны значительно изменяется. Решая квазиоптимизационную задачу по определению размеров верхней емкостной нагрузки, выреза в ней, а также ширины шунтов, можно добиться требуемого распределения значений  $R_{вх}$ .

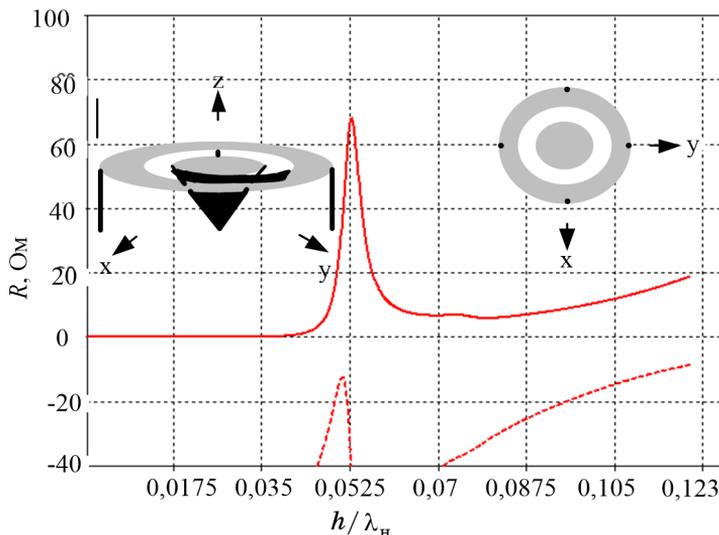


Рисунок 4 – Зависимость активной и реактивной составляющих  $R_{вх}$  вибратора от параметра  $h/\lambda_{н}$  при добавлении шунтов в конструкцию антенны

Таким образом, проведено исследование  $R_{вх}$  низкопрофильной антенны в зависимости от величины профиля излучателя. Для обеспечения постоянства значений  $R_{вх}$  предложены способы изменения конструкции низкопрофильной антенны.

### Список использованной литературы

1. Лянгузов Д.А. Низкопрофильная антенна с изменяемой диаграммой направленности // Системы управления, связи и безопасности. 2022. № 2. С. 80–91.
2. Марков Г.Т., Сазонов Д.М. Антенны : учеб. для студентов радиотехнических специальностей вузов. М. : Энергия, 1975. 528 с.

З. Бородулин Р.Ю. Конструкционный синтез электрически малых антенн : моногр. СПб. : ВАС, 2020. 180 с.

---

*Лянгузов Данила Андреевич – адъюнкт, каф. радиосвязи, Военная академия связи, 194064, г. Санкт-Петербург, пр. Тихорецкий, 3, e-mail: danilalgz@ya.ru.*

#### **LOW PROFILE ANTENNA INPUT IMPEDANCE STUDY**

*The article discusses the problem of ensuring the wide-bandwidth of a low-profile emitter while maintaining acceptable mass-dimensional characteristics of the exciting element.*

**Keywords:** *low profile antenna, exciter element.*

*Lyanguzov Danila Andreevich – Doctoral Student. The postgraduate student of the Department of Radio Communication. Military Communications Academy named after the Marshal of the Soviet Union S. M. Budenny. 194064, Russia, St. Petersburg, Tikhoretsky avenue, 3. E-mail: danilalgz@ya.ru.*

**УДК 621.396.674**

**К.Д. Зайков, А.С. Аникин**

#### **АНТЕННАЯ СИСТЕМА МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ТИПА CUBESAT**

*CubeSat является актуальным направлением развития космической технологии благодаря компактной платформе с широким функционалом. Представлен результат разработки антенной системы для CubeSat.*

**Ключевые слова:** *CubeSat, малый космический аппарат, антенна, антенная система, диаграммообразующая схема*

CubeSat является актуальным направлением развития космической технологии, так как он представляет собой компактную платформу, которая может использоваться для решения широкого спектра научных и прикладных задач в области космической связи, дистанционного зондирования Земли, энергетики, медицины и в других областях. CubeSat обычно имеют небольшие размеры и вес, что делает их идеальными для установки антенн на поверхности спутника. Эти антенны могут использоваться для обеспечения связи с другими спутниками или для приема сигналов от других космических аппаратов.

В ТУСУРе в рамках проекта передовой инженерной школы «Электронное приборостроение и системы связи» им. А.В. Кобзева разработанная антенная система для CubeSat.

К антенной системе выдвигались следующие требования:

- всенаправленное излучение;
- круговая поляризация;
- центральная частота 868 МГц;
- габариты 92×92 мм, не более (при превышении габаритов антенна должна быть складной);
- интерфейс СВЧ-разъёма SMA;
- входное сопротивление 50 Ом.

Цель настоящего доклада – представление результатов разработки антенной системы для малого космического аппарата.

Разработанная антенна представляет собой два перпендикулярных диполя, образующих так называемый «турникет» с круговой поляризацией и интерфейсом SMA 50 Ом (рисунок 1).

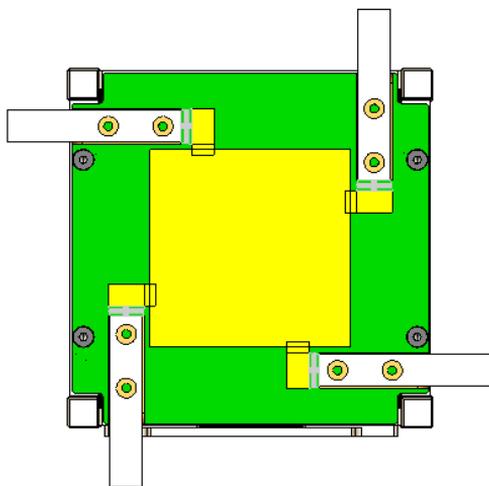


Рисунок 1 – Антенна, спроектированная для малого космического аппарата

Характеристики антенны представлены на рисунках 2 и 3.

Диапазон рабочих частот антенны 788–973 МГц; коэффициент усиления минус 2,5 – 2,22 дБи.

Характеристики спроектированной антенны полностью удовлетворяют требованиям технического задания.

Антенна нуждается в четырёхточечной квадратурной запитке, поэтому необходима диаграммообразующая схема (ДОС).

Назначение диаграммообразующей схемы заключается в формировании четырёх каналов со смещением фазы на 90 градусов в каждом

канале относительно соседних. Диаграммообразующая схема должна иметь один вход. Разработанная схема ДОС представлена на рисунке 4.

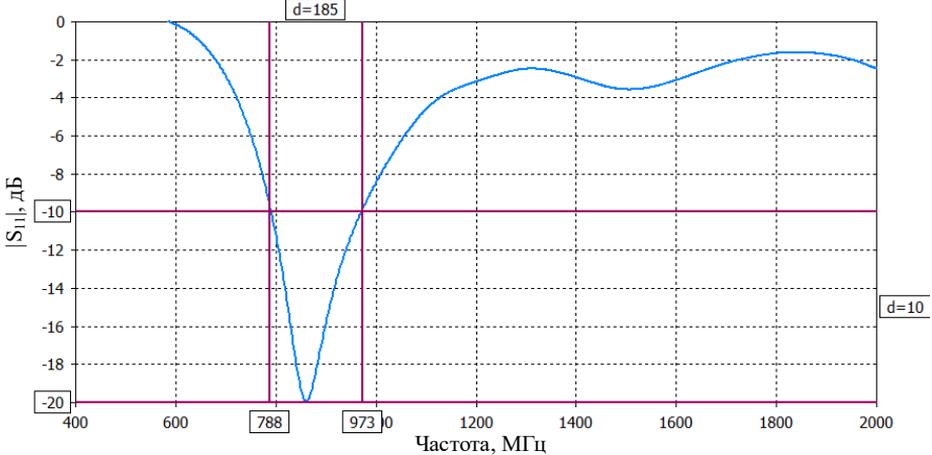


Рисунок 2 – Модуль коэффициента отражения антенны

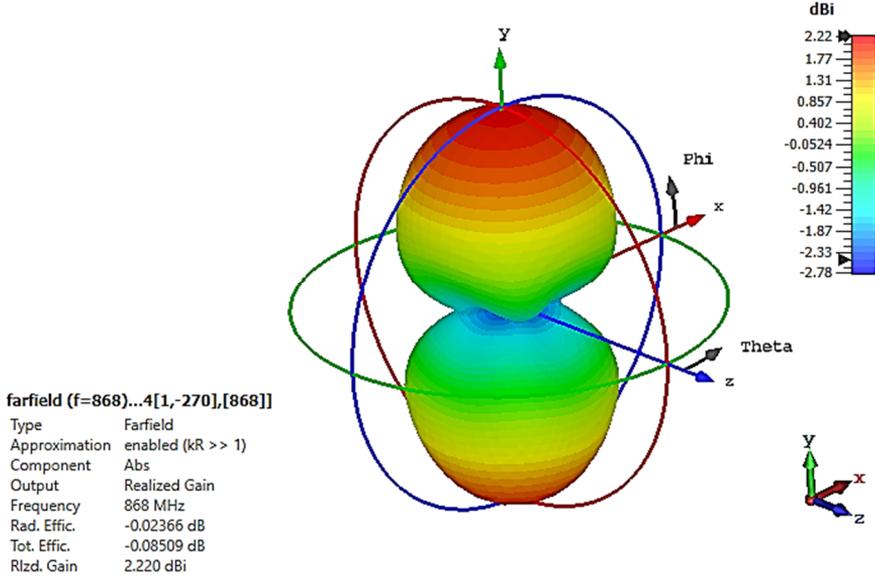


Рисунок 3 – Пространственная диаграмма направленности антенны

В качестве фазовращателя использовали микрополосковую линию задержки, поскольку полезная нагрузка, для которой предназначена данная антенная система, узкополосная. Отказ от использования сосредоточенного фазовращателя увеличивает надежность антенной системы

и срок её службы. В качестве квадратурных мостов выбраны сосредоточенные элементы, поскольку планарное исполнение в данном диапазоне частот имеет большие габариты.

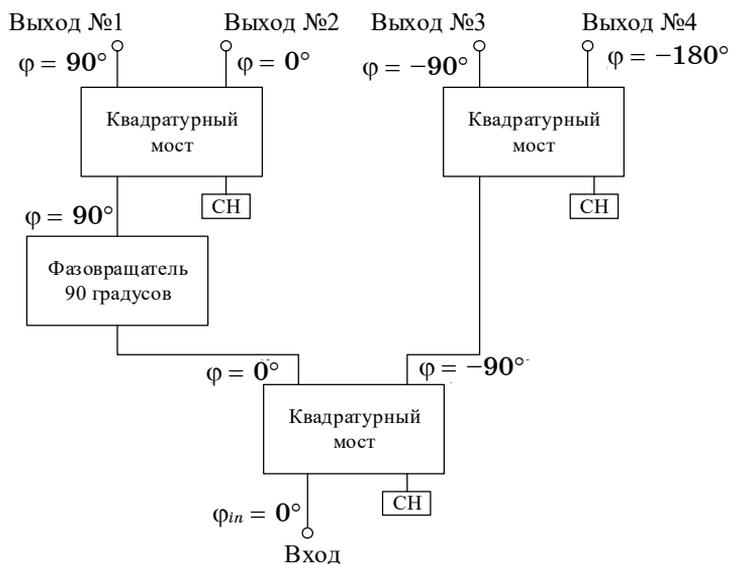


Рисунок 4 – Диаграммообразующая схема

Внешний вид разработанной антенной системы представлен на рисунке 5.

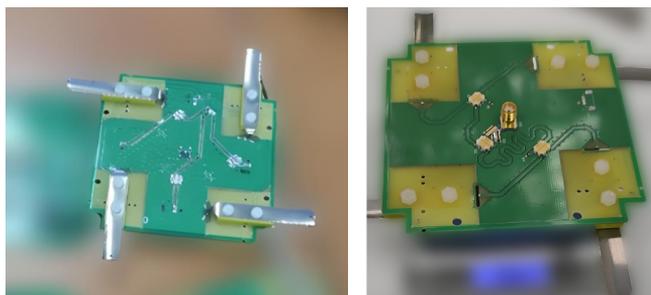


Рисунок 5 – Внешний вид разработанной антенной системы

Испытания антенной системы показали:

- дисбаланс коэффициента передачи в каналах ДОС не превышает 1 дБ;
- дисбаланс фаз в каналах ДОС не превышает 5 градусов;
- коэффициент усиления антенной системы составляет 0 дБ;
- КСВН по выходу антенной системы не превышает 1,5.

---

*Зайков Кирилл Денисович – мл. науч. сотрудник, Научно-исследовательский институт радиотехнических систем, аспирант, каф. радиотехнических систем, Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, e-mail: kirill.d.zailov@tusur.ru.*

#### **ANTENNA SYSTEM OF A SMALL SPACECRAFT OF THE TYPE CUBESAT**

*CubeSat is an actual direction of space technology development, as it is a compact platform with a wide functionality. The report presents the result of antenna system development for CubeSat within the framework of the project of advanced engineering school of TUSUR. The obtained characteristics of the antenna fully meet the requirements of the purpose of the developed product.*

**Keywords:** *CubeSat, small spacecraft, antenna, antenna system, diagrammatic scheme.*

*Zaikov Kirill Denisovich – Junior Researcher, Tomsk State University of Control Systems and Radio- 94 electronics, 634050, Tomsk, Lenin Ave., 40, e-mail: kirill.d.zaikov@tusur.ru.*

**УДК 621.396**

**Д.В. Сальников, А.Е. Францишко**

#### **СПОСОБ РАСШИРЕНИЯ СПЕКТРА НАВИГАЦИОННЫХ РАДИОСИГНАЛОВ СПУТНИКОВЫХ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ОСОБЕННОСТЕЙ МЕАНДРОВОЙ ПОДНЕСУЩЕЙ МОДУЛЯЦИИ**

*Предложен способ расширения спектра навигационных радиосигналов спутниковых радионавигационных систем, повышающий качество приема навигационного сигнала на фоне помех естественного и искусственного происхождения. Заявленный способ расширения полосы навигационных сигналов ГЛОНАСС основан на использовании особенностей меандровой поднесущей модуляции (binary offset carrier (BOC)).*

**Ключевые слова:** *ГЛОНАСС, точность навигационных определений, помехоустойчивость приема сигналов, меандровая поднесущая модуляция (BOC)*

В настоящее время к глобальным навигационным спутниковым системам (ГНСС) предъявляются все более высокие требования по точности навигационных определений, помехоустойчивости приема сигналов, доступности и другим характеристикам [1, 2]. Для удовлетворения

этим требованиям в существующих ГНСС, а именно ГЛОНАСС, *GPS*, *BeiDou*, *Galileo*, рассматривается возможность использования радиосигналов с различными типами модуляции [1–4].

В ГНСС применяются сигналы с бинарной фазовой манипуляцией, сокращенное обозначение *BPSK*( $n$ ) (*binary phase shift keying*), частота следования символов дальномерного кода  $f_{\text{дк}} = n \cdot 1,023$  МГц. Наряду с модуляцией *BPSK*( $n$ ) используется бинарная фазовая модуляция на поднесущих частотах, которую в зарубежной литературе обозначают *BOC*( $m, n$ ) (*binary offset carrier*), частота следования символов дальномерного кода  $f_{\text{дк}} = n \cdot 1,023$  МГц, частота поднесущей (меандровой последовательности)  $f_{\text{м}} = m \cdot 1,023$  МГц.

Математически *BOC*-сигнал записывается следующим образом [1]

$$s_{\text{BOC}}(t) = A \cdot G_{\text{дк}}(t) \cdot G_{\text{м}}(t) \cdot \cos(2\pi f_0 t + \varphi_0), \quad (1)$$

где  $A$  – амплитуда радиосигнала;  $f_0$  – несущая частота радиосигнала;  $\varphi_0$  – начальная фаза несущего колебания;  $G_{\text{дк}}(t) = G_{\text{ци}}(t) G_{\text{тс}}(t) \times G_{\text{пспдк}}(t)$  – бинарная модулирующая последовательность, формируемая перемножением трех двоичных последовательностей: псевдослучайной последовательности дальномерного кода (ПСПДК)  $G_{\text{пспдк}}(t)$ ; посылок навигационного сообщения (в случае информационного сигнала)  $G_{\text{ци}}(t)$ ; посылок синхрокода для обеспечения тактовой синхронизации навигационного приемника  $G_{\text{тс}}(t)$ ;  $G_{\text{м}}(t) = \text{sign}(\sin(2\pi f_{\text{м}} t))$  – дополнительная бинарная функция амплитудной модуляции на поднесущих частотах;  $\text{sign}(x)$  – знаковая функция, принимающая значения  $\pm 1$  в зависимости от знака аргумента.

Структурная схема модулятора *BOC* приведена на рисунке 1.

Важной особенностью радиосигналов с *BOC*-модуляцией является то, что более мощные спектральные составляющие сосредоточены на краях занимаемого частотного диапазона в двух группах главных лепестков спектра (более 90% мощности), между которыми находится глубокий провал (рисунок 2). Ширину спектра такого радиосигнала определяют по крайним границам главных лепестков как  $\Delta f_{\text{BOC}} = 2f_b(m + n)$  [5]. Другой важной особенностью таких сигналов является возможность приема главных лепестков спектра по отдельности.

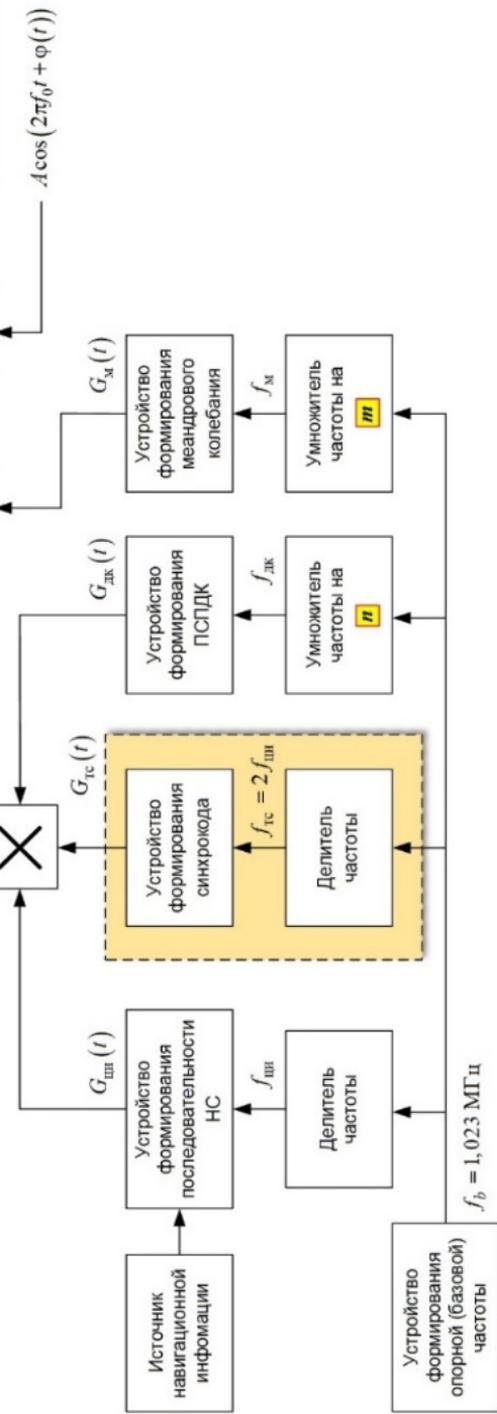


Рисунок 1 – Модулятор ВОС радионавигационных сигналов

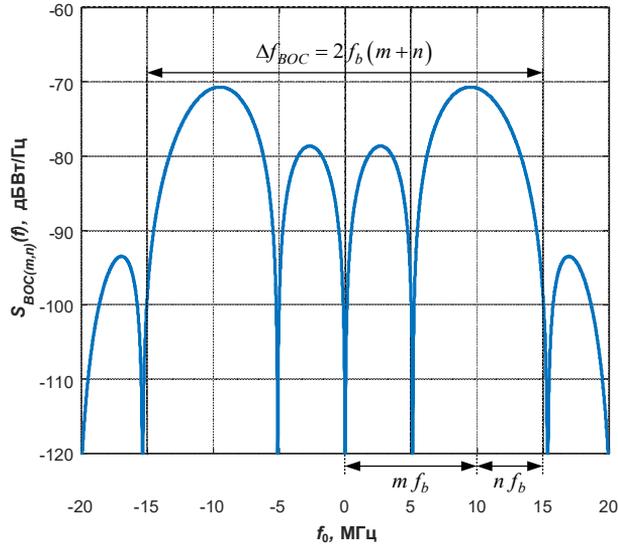


Рисунок 2 – Спектральная плотность мощности сигнала  $VOC(10,5)$

Указанные особенности меандровой модуляции  $VOC(m,n)$  можно использовать для расширения спектра навигационных радиосигналов ГНСС ГЛОНАСС. Предлагается посредством назначения значений коэффициентов меандровой модуляции  $m, n$  и несущих частот  $f_0$  размещать образующиеся  $VOC$ -сигналы одновременно в двух частотных диапазонах [6] в любом их сочетании (рисунок 3):  $L2-L1$  на несущей частоте  $f_{0L2-L1} = 1423,9$  МГц;  $L3-L2$  на несущей частоте  $f_{0L3-L2} = 1223,575$  МГц;  $L3-L1$  на несущей частоте  $f_{0L3-L1} = 1400,175$  МГц.

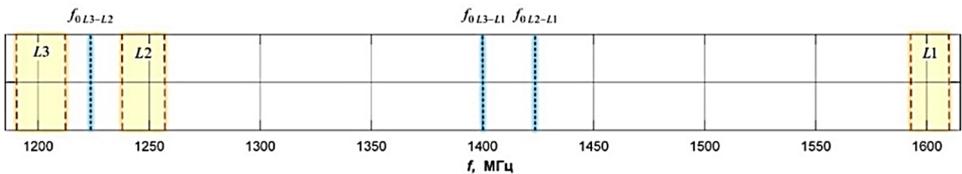


Рисунок 3 – Частотные диапазоны ГНСС ГЛОНАСС

Возможный диапазон значений коэффициентов меандровой модуляции  $m, n$  и несущих частот  $f_0$  является решением комбинаторной задачи с введенными ранее ограничениями, которое осуществлялось разработанной для этой цели программой [7]. Результаты решения приведены в таблице 1.

Для расчета и графической визуализации (рисунок 4) спектральной плотности мощности радионавигационных сигналов с меандровой модуляцией  $VOC(m,n)$  при задаваемых значениях коэффициентов  $m, n$

глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС в диапазонах  $L3-L2$ ,  $L2-L1$  и  $L3-L1$  разработана программа [8].

Таблица 1 – Дуэльный диапазон числовых значений  $m$ ,  $n$  для частотного диапазона  $L3-L2$

$n$	$m$																
1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3
2	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1
3	1	2	2	2													
4	8	1	2	2	2	2											
5	8	0	2	4	6	8											
6	2	2															
7	0	5															
8	2	2															
	1	4															

Дуэльный диапазон числовых значений  $m$ ,  $n$  для частотного диапазона  $L2-L1$

$n$	$m$														
1	16	16	16	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	18
2	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	
3	16	16	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17		
4	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9			
5	16	17	17	17											
6	8	1	4	7											
7	17	17	17	17											
8	0	2	4	6											
	17	17													
	0	5													
	17	17													
	1	4													

Дуэльный диапазон числовых значений  $m$ ,  $n$  для частотного диапазона  $L3-L1$

$n$	$m$															
1	190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	
2	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203			
3	192	195	198	201												
4	194	196	198	200												
5	195	200														
6	195	198														
7	196															

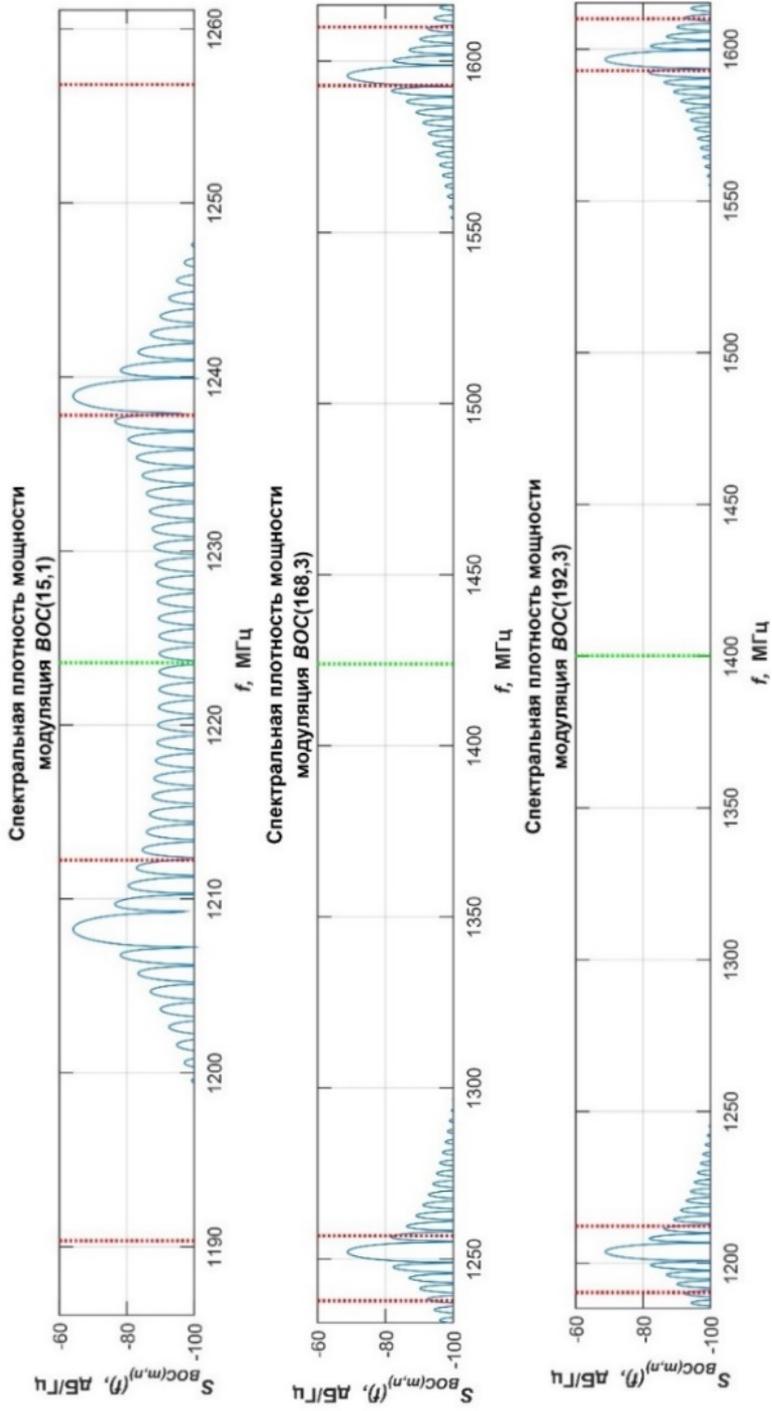


Рисунок 4 – Спектральная плотность мощности VOS (m,n)-сигналов

Предполагаемая стратегия повышения точности и помехоустойчивости следующая. Устанавливается время работы на одной частоте  $T_f$  из перечня разрешенных  $f_{0L2-L1}$ ,  $f_{0L3-L2}$ ,  $f_{0L3-L1}$ . Задается время работы  $T_n$  модулятора *ВОС*-сигналов с одним номиналом коэффициента отношения частоты следования символов дальнего кода  $f_{дк}$  к опорной синхрочастоте  $n$  из перечня разрешенных (см. таблицу 1), соответствующих выбранной несущей частоте. Задается время работы  $T_m$  модулятора *ВОС*-сигналов с одним номиналом значения коэффициента отношения поднесущей частоты  $f_m$  к опорной (базовой) синхрочастоте  $m$  из перечня разрешенных (см. таблицу 1), соответствующих выбранной несущей частоте. Формируется программа псевдослучайного изменения номинала несущей частоты из назначенных  $f_{0L2-L1}$ ,  $f_{0L3-L2}$ ,  $f_{0L3-L1}$ . Формируется программа псевдослучайного дуэльного изменения значений коэффициентов меандровой модуляции радиосигналов  $m$ ,  $n$  из числового диапазона, соответствующего назначенной несущей частоте  $f_{0L2-L1}$ ,  $f_{0L3-L2}$ ,  $f_{0L3-L1}$ .

Проведен сравнительный анализ потенциальной точности оценки задержки приема навигационных *ВОС*-сигналов, приведенных в таблице 1. В таблице 2 для *ВОС* ( $m,n$ )-сигналов приведены средние значения характеристик потенциальной точности оценки задержки приема и псевдодальности для поддиапазонов  $L3-L1$ ,  $L2-L1$ ,  $L3-L2$  соответственно, в таблице 3 – средние значения характеристик потенциальной помехоустойчивости. Применение *ВОС*-сигналов, представленных в таблице 1, дает выигрыш потенциальной точности оценки задержки приема и псевдодальности в 100–1000 раз по сравнению с *BPSK*.

Таблица 2 – Характеристики точности оценки задержки приема и псевдодальности *ВОС*-сигналов

Вид модуляции	$\sigma_\tau$ , с	$\sigma_{пд}$ , м
<i>BPSK</i> (0,5)	$3,7 \cdot 10^{-8}$	11,067
<i>BPSK</i> (5)	$3,7 \cdot 10^{-9}$	1,1
<i>BPSK</i> (10)	$1,8 \cdot 10^{-9}$	0,55
<i>ВОС</i> ( $m,n$ ) для $L3-L1$	$3,0 \cdot 10^{-11}$	0,01
<i>ВОС</i> ( $m,n$ ) для $L2-L1$	$3,0 \cdot 10^{-11}$	0,01
<i>ВОС</i> ( $m,n$ ) для $L3-L2$	$3,0 \cdot 10^{-10}$	0,1

Таблица 3 – Характеристики помехоустойчивости ВОС-сигналов

Вид модуляции	$\Delta f$ , МГц	$R$ , бит/с	$B$ , дБ
<i>BPSK</i> (0,5)	1,022	50	43,105
<i>BPSK</i> (5)	10,22	50	53,105
<i>BPSK</i> (10)	20,46	50	56,119
ВОС ( $m, n$ ) для $L3-L1$	400,0	50	69,031
ВОС ( $m, n$ ) для $L2-L1$	175,0	50	65,441
ВОС ( $m, n$ ) для $L3-L2$	22,5	50	56,532

В предлагаемом способе [9] реализована возможность формирования сигналов с меандровой поднесущей модуляцией на псевдослучайных рабочих частотах посредством псевдослучайного закона назначения номиналов коэффициентов  $m, n$ , чем достигается повышение точности и помехоустойчивости приема радионавигационного сигнала на фоне помех естественного и искусственного происхождения.

### Список использованной литературы

1. ГЛОНАСС. Модернизация и перспективы развития : моногр. / под ред. А.И. Перова. М. : Радиотехника, 2020. 1072 с.
2. Ярлыков М.С. Меандровые шумоподобные сигналы (ВОС-сигналы) и их разновидности в спутниковых радионавигационных системах : моногр. М. : Радиотехника, 2017. 416 с.
3. Перов А.И., Болденков Е.Н. Сравнительный анализ характеристик приема сигналов спутниковых навигационных систем с модуляцией *BPSK*( $n$ ) и *ВОС*( $m, n$ ) // Радиотехника. 2008. № 7. С. 26.
4. Харисов В.Н., Оганесян А.А. Потенциальные характеристики помехоустойчивости перспективных сигналов ГНСС // Радиотехника. 2010. № 7. С. 121.
5. Шатилов А.Ю. Характеристики радиосигналов глобальных спутниковых радионавигационных систем ГЛОНАСС, *GPS*, *Galileo*, *BeiDou* и функциональных дополнений *SBAS* : учеб. пособие для вузов. М. : МЭИ, 2015. 36 с.
6. Регламент радиосвязи Международного союза электросвязи. ITU. 2012.
7. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2021669613 Российская Федерация. Расчет коэффициентов  $m, n$  меандровой модуляции радиосигналов *ВОС*( $m, n$ ). Заявл. 01.12.2021. / Сальников Д.В., Цыбук А.Е., Балакин С.И. [и др.]
8. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2021669409 Российская Федерация. Расчет спектральной плотности мощности радионавигационных сигналов с меандровой

модуляцией  $BOC(m, n)$ . Заявл. 29.11.2021 / Сальников Д.В., Франтенко И.Ю., Журавлёв Д.А. [и др.].

9. Патент 2791443 Российская Федерация, МПК G01S 19/01 (2010.01). Способ расширения полосы навигационных сигналов ГЛОНАСС : № 2021139578 : заявл. 28.12.21 : опубл. 07.03.23 : Бюл. № 7 / Сальников Д.В., Журавлёв Д.А., Цыбук А.Е., Платонов С.Н., Франтенко И.Ю. 2 с.

---

*Сальников Денис Владимирович – канд. техн. наук, доцент, каф. военных систем космической, радиорелейной, тропосферной связи и навигации, Военная академия связи, 194064, г. Санкт-Петербург, К-64, Тихорецкий проспект, д. 3, e-mail: denis\_salnikov@mail.ru.*

*Францишко Анна Евгеньевна – инженер научно-исследовательский центр, Военная академия связи, 194064, г. Санкт-Петербург, К-64, Тихорецкий проспект, д. 3.*

**A METHOD FOR EXPANDING THE SPECTRUM  
OF NAVIGATION RADIO SIGNALS  
OF SATELLITE RADIO NAVIGATION SYSTEMS BASED  
ON THE FEATURES OF MEANDER SUBCARRIER MODULATION**

*The article proposes a way to expand the spectrum of navigation radio signals of satellite radio navigation systems to improve the quality of reception of the navigation signal against the background of interference of natural and artificial origin. The claimed method of expanding the band of GLONASS navigation signals is based on the use of the features of the meander subcarrier modulation (binary offset carrier).*

**Keywords:** *GLONASS, accuracy of navigation definitions, noise immunity of signal reception, meander subcarrier modulation (BOC)*

*Salnikov Denis V. – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Military Systems of Space, Radio Relay, Tropospheric Communications and Navigation, Military Academy of Communications, 194064, St. Petersburg, K-64, Tikhoretsky Avenue, 3, e-mail: denis\_salnikov@mail.ru.*

*Franzishko Anna E. – an engineer, research Centre, Military Academy of Communications, 194064, St. Petersburg, K-64, Tikhoretsky Avenue, 3.*

М.А. Воронов, С.М. Воронов

## РЕГИОНАЛЬНЫЕ СЕТИ НАЗЕМНЫХ ИСТОЧНИКОВ НАВИГАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ КАК РЕЗЕРВ ГЛОНАСС

*Рассматривается вариант навигационных определений при отсутствии доступа к сигналам ГЛОНАСС в отдельных регионах России по сигналам наземных навигационных источников, работающих в длинноволновом и ультракоротковолновом диапазонах частот.*

**Ключевые слова:** глобальные навигационные спутниковые системы, локальная сеть, наземные источники навигационных сигналов, региональная сеть, резервная система

Уязвимость технологий глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) заставляет специалистов как за рубежом, так и в России искать технические решения, обеспечивающие выполнение навигационных определений и синхронизации шкал времени в отсутствие доступа к сигналам ГНСС.

Специалистами АО «РИРВ» предложены принципы, на которых должна строиться резервная система навигации [1]:

- альтернативность технической реализуемости, исключаящая уязвимость от общих с ГНСС негативных факторов;
- адекватность функционального замещения (обеспечение близких с ГНСС характеристик по точности, доступности, непрерывности);
- экономическая целесообразность.

Исходя из принципов альтернативности технической реализации и адекватности функционального замещения, в [1] предложен вариант резервной для ГЛОНАСС системы, представляющей собой сетевую структуру опорных станций длинноволнового (ДВ) диапазона частот и контрольно-корректирующих станций (ККС), равномерно распределенных по территории России (33 опорных и 1400 корректирующих станций).

В целях повышения точности навигационных определений при использовании резервной системы предлагается создать ее как сетевую структуру наземных источников навигационных сигналов (НИНС), работающих в длинноволновом и ультракоротковолновом (УКВ) диапазонах частот [2].

Такое построение системы может обеспечить точность навигационных определений в районах, прилегающих к территории России, со среднеквадратической погрешностью (СКП) 8,5 м и во внутренних районах страны с СКП 1–2 м.

Однако это требует размещения на территории России порядка 7 тыс. НИНС, работающих в УКВ-диапазоне [3].

Очевидно, что создание такой системы затратно даже при условии совмещения НИНС с существующими спутниковыми референчными станциями, базовыми станциями операторов мобильной связи, вышками эфирного цифрового телевидения и сокращения общего числа НИНС, работающих в ДВ-диапазоне, за счет их размещения только по периферии страны.

Учитывая неравномерность распределения плотности населения и интенсивности экономической деятельности по территории страны, возможно поэтапное масштабирование сетевой структуры НИНС, работающих в ДВ- и УКВ-диапазонах [3, 4].

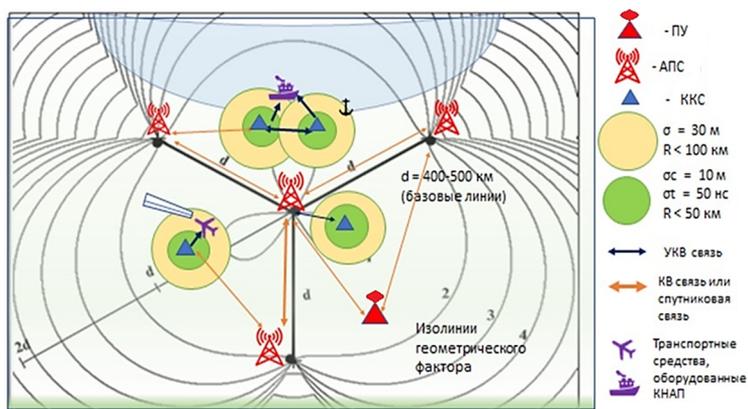
На первых этапах необходимо создание [4]:

- региональных сетей на базе импульсно-фазовых радионавигационных систем (ИФРНС) нового поколения для Арктического региона и Северного морского пути, Дальневосточного региона, зоны западных и южных границ страны;

- локальных сетей НИНС, работающих в УКВ-диапазоне по технологии «псевдоспутник», для акваторий портов, зон аэропортов, узкоствей рек, карьеров по добыче полезных ископаемых и т.п.

Следует отметить, что в каждом регионе сети НИНС, работающие в ДВ- и УКВ-диапазонах, должны функционировать в единой системе координат, в единой шкале времени и в едином информационном пространстве (управляться из единого центра) [3, 4].

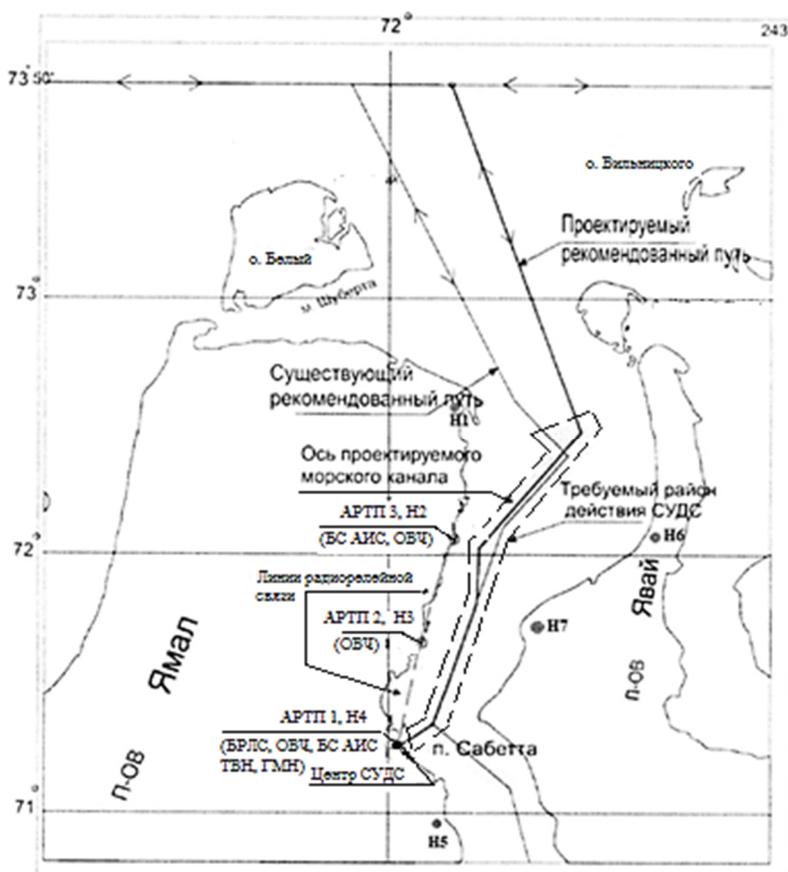
На рисунке 1 представлен вариант региональной сети на базе ИФРНС [4].



КНАП – комплексная навигационная аппаратура потребителя, работающая по сигналам как ГНСС, так и НИНС

Рисунок 1 – Вариант региональной сети на базе импульсно-фазовых радионавигационных систем

На рисунке 2 представлен вариант локальной сети НИНС, работающих в УКВ-диапазоне, для обеспечения безопасности судоходства в Обской губе [5].



Н1–Н7 – точки размещения НИНС  
 АРТП – автономные радиотехнические посты

Рисунок 2 – Вариант локальной сети наземных источников навигационных сигналов для обеспечения безопасности судоходства в Обской губе

Целесообразно при создании рассматриваемой системы обеспечить возможность работы НИНС УКВ-диапазона в двух режимах:

- функционального дополнения ГНСС;
- резервной навигационной системы при отсутствии доступа к сигналам ГНСС.

За счет выбора структуры и параметров навигационных сигналов может быть обеспечена СКП навигационных определений [5]:

- менее 2,4 м при отсутствии преднамеренных помех на входе аппаратуры потребителя;

– 2,8 м при возможных уровнях мощности помех в районе Обской губы (на 44 дБ больше мощности навигационного сигнала НИНС).

В целях обеспечения высокой помехоустойчивости в режиме резервирования целесообразно использовать несущие частоты, отличные от частот ГНСС, и обеспечить возможность программной перестройки несущих частот и смены дальномерных кодов.

### Список использованной литературы

1. Шебшаевич Б.В., Зарубин С.П., Баринов С.П. Состояние и перспективы развития наземных систем дальней радионавигации // Седьмая всероссийская конференция «Фундаментальное и прикладное координатно-временное обеспечение» (КВНО-2017) : тез. докл. СПб. : Изд-во ИПА РАН, 2017. С. 21–22.

2. Воронов М.А., Воронов С.М. Резервирование ГНСС наземными средствами // Шарыгинские чтения. I Всероссийская научная конференция ведущих научных школ в области радиолокации, радионавигации и радиоэлектронных систем передачи информации, посвященная памяти профессора Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники академика Германа Сергеевича Шарыгина : сб. докл. Томск : Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2019. С. 112–116.

3. Воронов М.А., Воронов С.М. Резервирование ГНСС сетевой структурой наземных источников навигационных сигналов, работающих в ДВ- и УКВ-диапазонах частот // Десятая всероссийская конференция «Фундаментальное и прикладное координатно-временное обеспечение» (КВНО-2023) : тез. докл. СПб. : Изд-во ИПА РАН, 2023. С. 53–54.

4. Писарев С.Б. Комплексная радиотехническая система координатно-временного и информационного обеспечения потребителей как альтернативный инструмент устойчивого навигационного и частотно-временного обеспечения // Десятая всероссийская конференция «Фундаментальное и прикладное координатно-временное обеспечение» (КВНО-2023) : тез. докл. СПб. : Изд-во ИПА РАН, 2023. С. 159.

5. Васильев В.С., Воронов М.А., Воронов С.М. Локальная псевдоспутниковая навигационная система обеспечения безопасности судоходства в Обской губе // Информация и космос. 2021. № 3. С. 105–109.

---

*Воронов Михаил Анатольевич – ст. науч. сотрудник, филиал федерального государственного унитарного предприятия «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» «Научно-исследовательский*

*институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова», 603951, г. Нижний Новгород, ул. Тропинина, 47, e-mail: mvoronov52@yandex.ru.*

*Воронов Сергей Михайлович – ведущий инженер-исследователь, филиал федерального государственного унитарного предприятия «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» «Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова», 603951, г. Нижний Новгород, ул. Тропинина, 47, e-mail:rupreht1977@mail.ru.*

## **REGIONAL NETWORKS OF GROUND-BASED NAVIGATION SIGNAL SOURCES, AS A RESERVE OF THE GLONASS SYSTEM**

*The article considers a variant of navigation definitions in the absence of access to GLONASS system signals in certain regions of Russia based on signals from ground-based navigation signal sources operating in the long-wave and ultrashort frequency ranges.*

**Keyword:** *global navigation satellite systems, local area network, ground navigation signal sources, regional network, backup system*

*Voronov Mikhail A. – senior researcher, branch of the Federal state unitary enterprise «Russian Federal nuclear center – all-Russian research Institute of experimental physics» «Research Institute of measuring systems. Y. E. Sedakov», 603951, Nizhny Novgorod, Tropinina str, 47, e-mail: mvoronov52@yandex.ru.*

*Voronov Sergey M. – leading research engineer, branch of the Federal state unitary enterprise «Russian Federal nuclear center – all-Russian research Institute of experimental physics» «Research Institute of measuring systems. Y. E. Sedakov», 603951, Nizhny Novgorod, Tropinina str, 47, e-mail: rupreht1977@mail.ru.*

А.С. Пустошилов, С.П. Царев

## СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ SPARSE RECOVERY ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ РАЗРЫВОВ В ФАЗОВЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ ОДНОЧАСТОТНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ ПРИЕМНИКОВ

*Рассматриваются методы обнаружения разрывов в фазовых измерениях одночастотных приемников. Цель исследования – разработка и сравнение двух алгоритмов обнаружения малых разрывов в фазовых измерениях одночастотных приемников без использования дополнительной информации. Применяются методы полиномиальной и адаптивной фильтрации гладкого тренда и алгоритмы sparse recovery для оценки разрывов в разности кодовых и фазовых измерений, что позволяет обнаруживать разрывы в один цикл на фоне шумовой составляющей сопоставимой величины с вероятностью 0,8.*

**Ключевые слова:** ГНСС, разрывы фазы, одночастотные приемники

Использование фазовых измерений приемников глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) существенно повышает точность решения навигационных задач. Для двухчастотных приемников обнаружение разрывов в фазовых измерениях обычно выполняется комбинацией Мельбуерна – Вуббена [1]. Для недорогих одночастотных приемников, появившихся в последнее время на рынке, построение такой комбинации невозможно, поэтому задача поиска разрывов для них решается посредством доплеровских измерений [2] с использованием нескольких спутников [3] либо в режимах относительного позиционирования [4]. В данной работе предлагаются новые алгоритмы, с высокой достоверностью находящие положения и величины разрывов в фазовых одночастотных измерениях без дополнительной информации, и проводится их сравнение.

**Постановка задачи и методы решения.** Приемники сети IGS [5] используют либо встроенные кварцевые опорные генераторы, либо внешние высокостабильные генераторы (атомные стандарты времени и частоты). В [6] показано, что для высокостабильных генераторов возможно надежное решение задачи детектирования и оценки величины разрывов обработкой самого временного ряда фазовых одночастотных измерений. У низкостабильных генераторов шум фазовых измерений, вызванный флуктуациями временной метки измерений, слишком велик. Мы предлагаем устранить влияние шума опорного генератора взятием разности кодовых и фазовых измерений одно-

частотного навигационного приемника. Рассмотрим эту разность  $y(t_i)$  как сумму трех составляющих:

$$y(t_i) = x(t_i) + s(t_i) + n(t_i), \quad (1)$$

где  $x(t_i)$  – кусочно-постоянная функция разрывов в фазовых измерениях;  $n(t_i)$  – остаточный шум измерений;  $s(t_i)$  – медленноменяющийся гладкий тренд;  $t_i$  – моменты измерений.

Запишем выражение для определения гладкого тренда:

$$s(t) = c \left[ \Delta t_{\text{Тракт НП}(L)}(t) - \Delta t_{\text{Тракт НС}(L)}(t) - \Delta t_{\text{Тракт НП}(C)}(t) + \Delta t_{\text{Тракт НС}(C)}(t) \right] + 2c\tau_{\text{ион}}(t) + \lambda(N + \omega(t)), \quad (2)$$

где  $c$  – скорость света;  $\lambda$  – длина волны;  $\Delta t_{\text{Тракт НС}(L)}$ ,  $\Delta t_{\text{Тракт НС}(C)}$  – фазовая и кодовая задержки в тракте спутника;  $\Delta t_{\text{Тракт НП}(L)}$ ,  $\Delta t_{\text{Тракт НП}(C)}$  – фазовая и кодовая задержки в тракте приемника;  $\tau_{\text{ион}}(t)$  – задержка сигнала в ионосфере;  $N$  – фазовая неоднозначность;  $\omega(t)$  – доворот фазы.

Задачу обнаружения и компенсации разрывов в фазовых измерениях можно сформулировать как задачу выделения кусочно-постоянной функции  $x(t_i)$  из аддитивной смеси этой функции с медленноменяющимся трендом и шумом.

Для решения этой задачи особенно эффективными оказались алгоритмы sparse recovery, основанные на минимизации полной вариации (TV – total variation) искомого вектора  $\mathbf{x}(\mathbf{x}_i = x(t_i))$ :

$$\text{TV}(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^{N-1} |\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_{i-1}|. \quad (3)$$

Общая идея подобных алгоритмов упрощенно описывается как нахождение разреженного (sparse) неизвестного вектора  $\mathbf{x}$  с помощью решения задачи оптимизации с нелинейной целевой функцией и нелинейными дополнительными ограничениями. В нашей работе алгоритмы [7] были усовершенствованы для повышения чувствительности при большом уровне шума с использованием регуляризованной нормы в  $L_p$ :

$$\text{TV}(\mathbf{x}, p, \varepsilon) = \sum_{i=1}^{N-1} (|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_{i-1}| + \varepsilon)^p, \quad (4)$$

где  $\varepsilon$  – маленькое число. Тогда задача нахождения кусочно-постоянной функции разрывов  $\mathbf{x}$  в смеси (1) формулируется следующим образом:

$$\begin{cases} \mathbf{x} = \arg \min_{\mathbf{x}} \text{TV}(\mathbf{x}, p, \varepsilon) \\ \text{при условии } \left\| \mathbf{F} \cdot (\mathbf{y} - \hat{\mathbf{x}}) \right\|_2 \leq r, \end{cases} \quad (5)$$

где  $\mathbf{y}$  – вектор разности кодовых и фазовых измерений;  $\mathbf{F}$  – линейный фильтр, зануляющий медленноменяющийся тренд;  $r$  – остаточный уровень шума.

Наши усовершенствования алгоритма SPATV-LP решения задачи (5): новые матрицы  $\mathbf{F}$  на основе полиномов Хана и ортонормированного адаптивного базиса, что повышает точность и устойчивость алгоритма; новый (по сравнению с [6]) прямой метод sparse recovery, не использующий полную вариацию (4). Все алгоритмы реализованы на языке Julia [8].

**Результаты (апробация на реальных данных).** Из официального архива IGS были получены файлы с односекундными измерениями от станций KIRO, REYK (с внутренним опорным генератором), выделены разности кодовых и фазовых измерений на диапазонах  $L1$  ( $C1-L1$ ) и фазовых измерений на диапазонах  $L1$  и  $L2$  ( $L1-L2$ ) для спутников ГЛОНАСС. Выбрано 1000 интервалов длительностью 2 000 с без разрывов фазовых измерений (проверка применением фильтрации к разности  $L1-L2$ ). На каждом интервале случайным образом формировалось от 2 до 5 разрывов величиной от 1 до 6 циклов. По результатам применения алгоритма SPHATV-LP была вычислена вероятность правильной идентификации разрывов: 80% для 1 000 экспериментов. На рисунке 1 показан пример такого обнаружения разрывов.

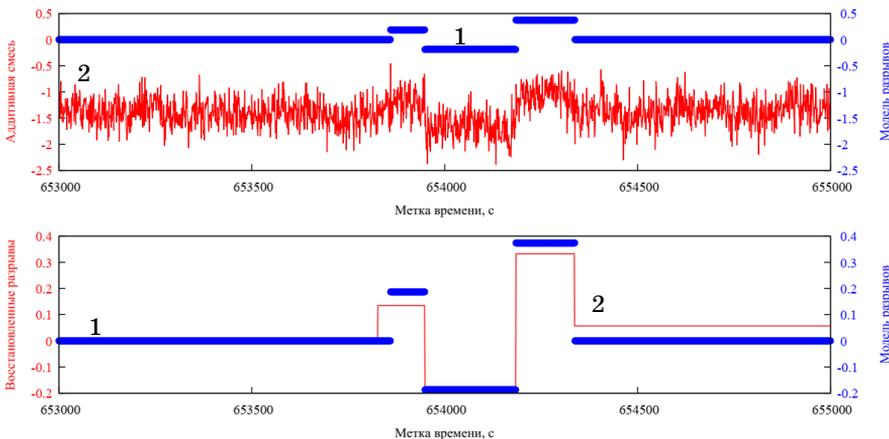


Рисунок 1 – Обнаружение множественных модельных разрывов в разности кодовых и фазовых измерений алгоритмом SPHATV-LP

Верхний график (единица измерения – метры) отображает модельные разрывы (1) и сумму реальных данных и моделируемых разрывов (2); нижний – моделируемые (1) и восстановленные (2) разрывы. Видно, что имеется относительно небольшая ошибка восстановления.

Были также опробованы прямые методы sparse recovery с матрицей дискретных ортогональных полиномов Хана. Результат восстановления вектора разрывов  $x$  для тех же данных приведен на рисунке 2. Как видно, восстановление происходит с намного большим числом разрывов и менее точными их положениями и величинами.

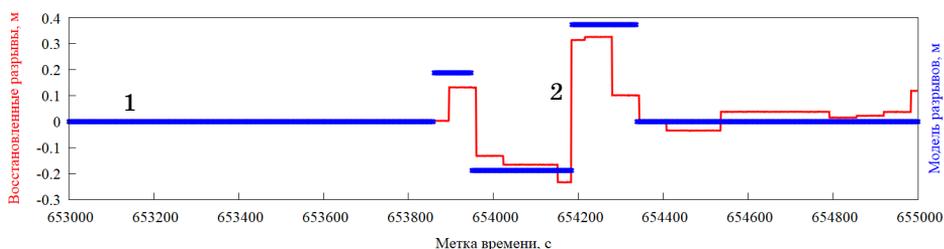


Рисунок 2 – Обнаружение множественных модельных разрывов в разности кодовых и фазовых измерений прямым методом sparse recovery

**Заключение.** Для одночастотных приемников с низкостабильным опорным генератором возможно достаточно точное нахождение разрывов в разности кодовых и фазовых измерений с использованием алгоритмов sparse recovery. Наилучшие результаты показали алгоритмы на основе минимизации полной вариации. Этими алгоритмами обнаруживаются множественные разрывы с вероятностью не менее 0,8 при отношении величины разрывов к СКО шума, близком к единице.

*Исследование выполнено в рамках государственного задания  
ФГАОУ ВО Сибирский федеральный университет  
(номер FSRZ- 2023-0008).*

### Список использованной литературы

1. Blewitt G. An automatic editing algorithm for GPS data // Geophysical research letters. 1990. V. 17, N 3. P. 199–202. doi: 10.1029/GL017i003p00199.
2. Cederholm P., Plausinaitis D. Cycle Slip Detection in Single Frequency GPS Carrier Observations Using Expected Doppler Shift // Nordic Journal of Surveying and Real Estate Research. 2014. V. 10, N 1. P. 63–79.

3. A New Cycle Slip Detection and Repair Method Using a Single Receiver's Single Station B1 and L1 Frequencies in Ground-Based Positioning Systems / X. Zhao, Z. Niu, G. Li [et al.] // Sensors. 2020. V. 20, N 2. P. 346. doi:10.3390/s20020346.

4. Single-frequency GNSS cycle slip estimation with positional polynomial constraint / B. Li, T. Liu, L. Nie [et al.] // Journal of Geodesy. 2019. V. 93, N 9. P. 1781–1803. doi:10.1007/s00190-019-01281-7.

5. The International GPS Service (IGS): An interdisciplinary service in support of Earth sciences / G. Beutler, M. Rothacher, S. Schaer [et al.] // Advances in Space Research. 1999. V. 23, N 4. P. 631–653.

6. Пустошилов А.С. Повышение точности обработки данных ГНСС с использованием полиномиальных и адаптивных методов : дис. ... канд. техн. наук. Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2021.

7. Selesnick I.W., Arnold S., Dantham V.R. Polynomial Smoothing of Time Series With Additive Step Discontinuities // IEEE Transactions on Signal Processing. 2012. V. 60, N 12. P. 6305–6318. doi: 10.1109/TSP.2012.2214219.

8. The Julia Programming Language. URL: <https://julialang.org/> (дата обращения: 01.06.2020).

---

*Пустошилов Александр Сергеевич – канд. техн. наук, доцент, каф. радиотехники Института инженерной физики и радиоэлектроники Сибирского федерального университета, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79, e-mail: apustoshilov@sfu-kras.ru.*

*Царев Сергей Петрович – проф., д-р физ.-мат. наук, проф. каф. радиотехники Института инженерной физики и радиоэлектроники Сибирского федерального университета, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79, e-mail: sptsarev@mail.ru.*

#### **COMPARISON OF SPARSE RECOVERY METHODS FOR DETECTING OF PHASE SLIPS IN MEASUREMENTS OF SINGLE-FREQUENCY NAVIGATION RECEIVERS**

*The article discusses various sparse recovery methods for detecting discontinuities in phase measurements of single-frequency receivers. For two-frequency receivers, this problem is solved by constructing Melbourne-Wubben combinations, which is impossible for single-frequency receivers. The purpose of the study is to develop and compare two algorithms for detecting small discontinuities in phase measurements of single-frequency receivers without using additional information. The methods of polynomial and adaptive filtering of the slow trend in measurements and modified sparse recovery algorithms are used to estimate discontinuities in the difference between code and phase*

measurements. The developed algorithms detect discontinuities of 1 cycle for a noise component of comparable magnitude with a probability of 0,8.

**Keywords:** GNSS, phase slips, single-frequency receivers

*Pustoshilov Aleksandr Sergeevich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Radiotechnics, Institute of Engineering physics and radio electronics Siberian Federal University, 660041, Krasnoyarsk, Svobodny pr., 79, e-mail: apustoshilov@sfu-kras.ru.*

*Tsarev Sergey Petrovich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Department of Radiotechnics, Institute of Engineering physics and radio electronics Siberian Federal University, 660041, Krasnoyarsk, Svobodny pr., 79, e-mail: sptsarev@mail.ru.*

**УДК 621.396.4**

**П.С. Тяпкин, Н.А. Важенин, А.П. Плохих**

**АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ  
МЕТОДОВ СЛЕПОГО РАЗДЕЛЕНИЯ СИГНАЛОВ ДЛЯ БОРЬБЫ  
С ПОМЕХОВЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ  
В СИСТЕМАХ КОСМИЧЕСКОЙ СВЯЗИ**

*Рассмотрены вопросы применения алгоритмов слепого разделения сигналов в задачах повышения помехоустойчивости канала спутниковой связи с восьмипозиционной фазовой манипуляцией к воздействию излучений, вызванных работой электрических ракетных двигателей (ЭРД). Разработана имитационная модель канала связи с разнесенным приемом на две антенны. При моделировании, кроме тепловых шумов, исследованы квазипериодические шумоподобные сигналы, формируемые в результате работы стационарных плазменных двигателей (СПД). Используемые в исследовании алгоритмы слепого разделения сигналов основаны на методе анализа независимых компонентов. Оценена работоспособность алгоритмов SOBI и nc-FastICA для выделения фазово-манипулированных сигналов из смесей с помехами и шумами. Показана возможность эффективного использования алгоритмов слепого разделения сигналов для борьбы с помехами от СПД.*

**Ключевые слова:** *слепое разделение сигналов, анализ независимых компонентов, помехоустойчивость канала связи, фазовая манипуляция, имитационное моделирование*

Использование ЭРД для космических приложений в настоящее время быстро расширяется. Прогнозы показывают, что почти половина всех космических аппаратов в следующем десятилетии будет использовать электрические ракетные двигатели. Среди ЭРД наиболее передовыми можно назвать двигатели на эффекте Холла или в российской терминологии – стационарные плазменные двигатели [1]. Технология этих двигателей сформировалась несколько десятилетий назад и с тех пор постоянно совершенствуется. Более 100 моделей двигателей СПД размещено на геостационарных спутниках [2], один – на лунной орбите [3], более 1000 летает в составе неполной группировки SpaceX Starlink и вскоре несколько среднемошных двигателей будет использоваться в дальней космической миссии для посещения малой планеты 16 Psyche [4].

Несмотря на очевидные достоинства, ЭРД не лишены недостатка, ограничивающего их применение: в результате работы этих двигателей возникает собственное широкополосное электромагнитное излучение, которое при определенных условиях может значительно ухудшить качество приема сигналов космическими аппаратами (КА) от наземных станций. У СПД шумоподобное излучение является импульсным с длительностью импульсов от десятых долей микросекунды до десяти микросекунд и интервалом повторения 10–100 мкс [1, 5].

Для повышения помехоустойчивости каналов связи с космическими аппаратами, оснащенными СПД, предлагается использовать алгоритмы слепого разделения сигналов (СРС).

Алгоритмы SOBI [6] и nc-FastICA [7] основаны на методе анализа независимых компонентов, который базируется на применении математических статистик второго порядка и выше и позволяет выделять из входных смесей исходные сигналы при условии, что эти сигналы изначально статистически независимы между собой. При решении задачи разделения сигналов методом анализа независимых компонентов априори подразумевается, что в каждой из принятых смесей существует не более одного выделяемого сигнала с гауссовым законом распределения, а количество приемных антенн не меньше количества сигналов в каждой из принятых смесей сигнала, шума и помехи [8]. Алгоритмами слепого разделения сигналов не осуществляется идентификация и поиск полезного сигнала в смеси: эта задача должна осуществляться последующими каскадами приемника.

В результате моделирования были получены серии графиков зависимости вероятности битовой ошибки от величин битового отношения сигнал-шум при разных значениях отношения помеха-сигнал в канале и средней скважности импульсной помехи.

На основе разработанной имитационной модели показано, что применение алгоритмов слепого разделения сигналов позволяет повысить

помехоустойчивость каналов связи с ФМн-8 и импульсными помехами от СПД. Так, в случае приема сигнала ФМн-8 с импульсной помехой от СПД со средней скважностью 0,005 и отношениями помеха-сигнал 10 дБ в первом канале и 15 дБ во втором при величине битового отношения сигнал-шум 12,4 дБ вероятность битовой ошибки равна  $10^{-4}$ , что примерно в 21 раз ниже, чем в случае приема этих же смесей без слепой обработки.

### Список использованной литературы

1. Электрические ракетные двигатели космических аппаратов и их влияние на радиосистемы космической связи / Н.А. Важенин, В.А. Обухов, А.П. Плохих [и др.]. М. : Физматлит, 2013. 432 с.

2. The Technological and Commercial Expansion of Electric Propulsion in the Past 24 Years / D. Lev, R. Myers, K. Lemmer [et al.] // In Proceedings of the 35th International Electric Propulsion Conference. Atlanta, GA, USA. 8–12 October 2017.

3. Koppel C. Estublier D. The Smart-1 Electric Propulsion Subsystem // In Proceedings of the 39th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Huntsville, AL, USA. 20–23 July 2003.

4. Development of the Psyche Mission for NASA's Discovery Program / D.Y. Oh, S. Collins, D. Goebel [et al.] // In Proceedings of the 35th International Electric Propulsion Conference. Atlanta, GA, USA. 8–12 October 2017. Aerospace, 2020. Vol. 7, N 120. P. 26–30.

5. Плохих А.П., Важенин Н.А., Попов Г.А. Анализ влияния электромагнитного излучения стационарных плазменных двигателей на помехоустойчивость канала связи «земля – космический аппарат» // Космические исследования. 2019. Т. 57, № 5. С. 339–346.

6. A blind source separation technique using second-order statistics / A. Belouchrani [et al.] // IEEE Trans. Signal Process. 1997. V. 45, N 2. P. 434–444.

7. Novey M., Adali T. On Extending the Complex FastICA Algorithm to Noncircular Sources // IEEE Trans. Signal Process. 2008. V. 56, N 5. P. 2148–2154.

8. Blind Source Separation: Advances in Theory, Algorithms and Applications / ed. by G.R. Naik, W. Wang. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2014.

---

*Важенин Николай Афанасьевич – д-р техн. наук, проф., каф. 408 Московского авиационного института, 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, 4, e-mail: N.Vazhenin@mai.ru.*

*Плохих Андрей Павлович – д-р техн. наук, проф., каф. 408 Московского авиационного института, 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, 4, e-mail: plokhikh2001@mail.ru.*

*Тяпкин Павел Станиславович – аспирант, каф. 408 Московского авиационного института, 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, 4, e-mail: tjapkinp@yandex.ru.*

**ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS OF USING BLIND SIGNAL SEPARATION METHODS TO ELIMINATE INTERFERENCE EMISSIONS FROM ELECTRIC PROPULSION ENGINES IN SPACE COMMUNICATION SYSTEMS**

*The paper discusses the application of blind signal separation algorithms in the problems of increasing the noise immunity of a satellite communication channel with eight-position phase shift keying to the effects of interference caused by the operation of spacecraft electric propulsions (SEP). As part of the study, a simulation model of a communication channel with diversity reception on two antennas was developed. During the modeling, in addition to thermal noise, quasi-periodic noise-like signals generated as a result of the operation of stationary plasma thrusters (SPT), which are one of the types of electric propulsion engines, were considered as interference in the communication channel [1]. The blind signal separation algorithms used in the study are based on the independent component analysis method. The main goal of the simulation was to test the performance of the SOBI and nc-FastICA algorithms for separating phase-shift keyed signals from mixtures with interference and noise. The simulation results indicate the possibility of effectively using blind signal separation algorithms to combat interference from data transmission systems.*

**Keywords:** *blind signal separation, independent component analysis, noise immunity of a communication channel, phase shift keying, simulation modeling*

*Vazhenin Nikolay Afanasyevich – Doctor of Technical Sciences, Professor of dep.408 of the Moscow Aviation Institute, 125993, Moscow, Volokolamskoye shosse, 4, e-mail: N.Vazhenin@mai.ru.*

*Plokhikh Andrey Pavlovich – Doctor of Technical Sciences, Professor of dep.408 of the Moscow Aviation Institute, 125993, Moscow, Volokolamskoye shosse, 4, e-mail: plokhikh2001@mail.ru.*

*Tjapkin Pavel Stanislavovich – postgraduate student, dep.408, Moscow Aviation Institute, 125993, Moscow, Volokolamskoye shosse, 4, e-mail: tjapkinp@yandex.ru.*

А.Ю. Бадмаев, И.Н. Дуров, Р.А. Размыслов, И.И. Тимофеев

## ЭНЕРГОПРЕОБРАЗУЮЩАЯ АППАРАТУРА ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

*Изложены цели создания новой энергопреобразующей аппаратуры, проблемы, с которыми сталкиваются при ее проектировании, а также представлена структурная схема системы электропитания космического аппарата. Рассмотрены тенденции развития энергетически эффективных систем электропитания.*

**Ключевые слова:** космические аппараты, энергопреобразующая аппаратура, солнечные батареи

Система электропитания автоматического космического аппарата – это совокупность источников энергии и энергопреобразующих устройств, которые обеспечивают стабилизацию напряжения на входной шине питания нагрузки в соответствии с режимами работы системы или условиями эксплуатации космического аппарата (рисунок 1).

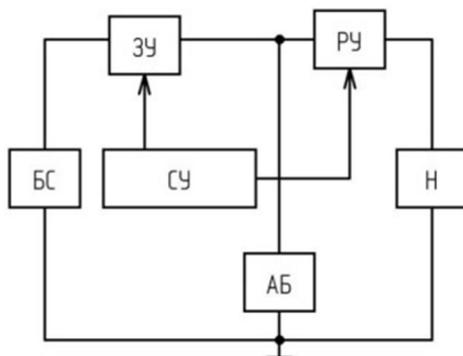


Рисунок 1 – Структурная схема системы электропитания космического аппарата: ЗУ – зарядное устройство; БС – батарея солнечная; СУ – система управления; РУ – разрядное устройство; Н – нагрузка

Выходное напряжение стабилизированной шины питания первых беспилотных космических аппаратов составляло 27–28 В. Параллельно-последовательная структура, наиболее широко используемая в системах электропитания космических аппаратов, позволила обеспечить максимальную выработку энергии солнечных батарей, т.е. режим экстремального регулирования мощности солнечных батарей.

С середины 1990-х годов стали появляться более жесткие требования к конструкции систем электропитания и космических аппаратов в целом. Количество задач, которые должен решать космический аппарат, увеличилось, как и количество оборудования для его электропитания. Требования к преобразовательной технике систем электропитания космических аппаратов связаны с повышением энергоэффективности, минимизацией массогабаритных характеристик, повышением надежности и радиационной стойкости, снижением стоимости разработки и производства. В США, Европе и России эта тенденция более выражена и доказала свою эффективность при повышении выходного напряжения до 100 В и продлении срока службы космических аппаратов до 15 лет.

Несмотря на значительные научно-технические достижения, разработку и успешное внедрение шунтовых систем электропитания для беспилотных космических аппаратов параметры вольт-амперных характеристик солнечных элементов варьируются в широких пределах, что приводит к низкой энергоэффективности, сильно меняющимся графикам нагрузки и изменяющимся условиям эксплуатации. Невозможно напрямую использовать достигнутые результаты для реализации высоковольтных систем электропитания других орбитальных типов космических аппаратов с различными условиями эксплуатации. Поэтому необходимы новые технологические решения и подходы к проектированию силовых преобразователей для высоковольтных систем электропитания космических аппаратов с повышенной энергоэффективностью, надежностью, легко согласуемыми уровнями напряжения питания и нагрузки, быстро меняющимися графиками нагрузки и изменяющимися условиями эксплуатации (например, космических аппаратов дистанционного зондирования Земли на низкой орбите) [1].

Тенденции в области разработки и создания мощных систем электропитания космических аппаратов направлены на увеличение количества выполняемых ими задач и повышение энерговооруженности, энергетической производительности, усовершенствование массогабаритных характеристик. Необходимо проектировать системы электропитания космических аппаратов с выходным напряжением питания нагрузки 100 В, с использованием многокаскадных солнечных батарей на арсениде галлия, литий-ионных аккумуляторных батарей. В системах электропитания должен осуществляться режим экстремального регулирования мощности солнечных батарей, а также согласования уровней напряжения источников энергии и нагрузки.

Таким образом, для проектирования системы электропитания автоматического космического аппарата с любыми заданными условиями эксплуатации и резкопеременными графиками нагрузок требуется:

1) разработка математической модели солнечной батареи, основанной на использовании экспериментальных вольт-амперных характеристик, предоставляемых изготовителями солнечных батарей, отличающейся простотой и обеспечивающей требуемую точность расчета параметров солнечных батарей для любых заданных значений освещенности и температуры;

2) создание методики расчета и выбора оптимального варианта системы электропитания космического аппарата, основанной на расчете энергобаланса и применении поправочных коэффициентов, обеспечивающей возможность оптимизации режимов работы системы электропитания с целью уменьшения массогабаритных характеристик;

3) разработка макетного образца модуля зарядного устройства аккумуляторной батареи для высоковольтной системы электропитания космического аппарата на основе преобразователя и его экспериментальное исследование.

### Список использованной литературы

1. Выбор структуры систем электроснабжения низкоорбитальных космических аппаратов / Ю.А. Шиняков, А.С. Гуртов, К.Г. Гордеев [и др.] // Вестн. Самарского гос. аэрокосмического ун-та. 2010. № 1(21). С. 103–113.

2. Бордина Н.М., Летин В.А. Влияние частичного затенения на характеристики солнечной батареи // Гелиотехника. 1988. № 3. С. 7–14.

3. Поляков С.А. Выбор режима работы солнечных батарей // Электронные и электромеханические системы и устройства. 2007. С. 49–58.

---

*Бадмаев Аюр Юрьевич – студент гр. 360-2, каф. промышленной электроники, Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, e-mail: abadmaev02@mail.ru.*

*Дуров Илья Николаевич – студент гр. 360-2, каф. промышленной электроники, Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, e-mail: Dink0220@mail.ru.*

*Размыслов Роман Анатольевич – студент гр. 360-2, каф. промышленной электроники, Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, e-mail: lagger8800@gmail.com.*

*Тимофеев Илья Игоревич – студент гр. 360-2, каф. промышленной электроники, Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, e-mail: ila47236@gmail.com.*

## POWER CONVERSION EQUIPMENT OF HIGH-VOLTAGE POWER SUPPLY SYSTEMS FOR SPACECRAFTS

*The goals of creating new energy-converting hardware, problems encountered in designing energy-converting hardware are described, and the structural scheme of spacecraft power supply systems is presented, by which the power supply systems of cosmic spacecraft are realized. Trends for creating energy efficient power supply systems are also described.*

**Keywords:** spacecrafts, energy-converting equipment, solar batteries

*Badmaev Ayur Yuryevich – student of gr. 360-2, Department of Industrial Electronics, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 634050, Tomsk, Lenin Ave. 40, e-mail: abadmaev02@mail.ru.*

*Durov Ilya Nikolaevich – student of gr. 360-2, Department of Industrial Electronics, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 634050, Tomsk, Lenin Ave. 40, e-mail: Dink0220@mail.ru.*

*Razmyslov Roman Anatolievich – student of gr. 360-2, Department of Industrial Electronics, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 634050, Tomsk, Lenin Ave. 40, e-mail: lagger8800@gmail.com.*

*Timofeev Ilya Igorevich – student of gr. 360-2, Department of Industrial Electronics, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 634050, Tomsk, Lenin Ave. 40, e-mail: ila47236@gmail.com.*

**УДК 621.396.96**

**Т.Н. Пушкарёв**

### ОБНАРУЖЕНИЕ МАЛОРАЗМЕРНЫХ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

*В последние годы роль беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) значительно возросла, так как их стали широко применять в различных отраслях. Постоянное совершенствование тактико-технических характеристик привело к уменьшению массогабаритных показателей, в связи с этим усложнилась задача их обнаружения. В настоящее время БПЛА активно применяются в военных действиях, что создает реальную военную и террористическую угрозу как для личного состава, так и для объектов критически важной инфраструктуры. Уровень этой угрозы с каждым днем становится все более высоким вследствие всеобщей доступности технологий производства и применения БПЛА. Таким образом, обнаружение БПЛА является первым этапом противодействия ему.*

**Ключевые слова:** БПЛА, обнаружение БПЛА, радионавигация, воздушный поток, давление, скорость

В соответствии с существующей классификацией БПЛА по их основным характеристикам можно разделить на две группы:

- малоразмерные беспилотные летательные аппараты (МБПЛА);
- БПЛА средних и больших размеров.

В связи с малой заметностью МБПЛА задача по их обнаружению и распознаванию является сложной и важной.

МБПЛА можно классифицировать по ряду параметров:

- габаритным и весовым характеристикам (длина, размах крыла, взлетная масса, масса полезной нагрузки);
- оперативным характеристикам (продолжительность, дальность и высота полета, максимальный радиус применения);
- типу конструкции (самолетная, вертолетная, аэростатическая, гибридная и др.);
- типу двигательной установки (электродвигатель, двигатель внутреннего сгорания, турбореактивный двигатель, реактивный двигатель), а также типу движителя (пропеллер, несущий винт, несущее крыло);
- выполняемым функциональным задачам (разведывательные, разведывательно-ударные, радиоэлектронной борьбы, транспортные);
- степени автономности (полет по фиксированной или корректируемой программе, дистанционно-пилотируемый полет) [1].

Согласно российской классификации, которая несколько отличается от международной, МБПЛА систематизируют следующим образом [2]:

- микро- и мини-БПЛА ближнего радиуса действия – взлетная масса до 5 кг, дальность применения до 25–40 км;
- легкие БПЛА малого радиуса действия – взлетная масса 5–50 кг, дальность применения 10–70 км;
- легкие БПЛА среднего радиуса действия – взлетная масса 50–100 кг, дальность применения 70–150 км.

В настоящее время степень заметности БПЛА определяют значением его сигнатур в радиочастотном, инфракрасном (ИК) и видимом диапазонах спектра, а также акустической сигнатурой. Разнообразие возможных вариантов построения и использования средств наблюдения в каждом из указанных диапазонов обуславливает трудности оценивания их эффективности.

*Акустический канал.* Суммарный спектр акустического излучения БПЛА включает гармонические и широкополосные составляющие: гармонические составляющие излучения двигателя, шума оборотов винта, излучение механической природы, высокочастотную и низкочастотную

составляющие шума двигателя с непрерывными по частоте спектрами [3].

*Оптический канал.* Оптическое обнаружение БПЛА очень сильно зависит от факторов окружающей среды. Увеличение дальности обнаружения достигается за счет сужения поля зрения, уменьшения зоны обзора и увеличения времени поиска. Поэтому визуальные сенсоры являются неэффективными устройствами для проведения поиска. При поступлении внешних целеуказаний от более эффективного поискового средства оптические сенсоры могут успешно использоваться для сопровождения БПЛА [4].

*ИК-канал.* Тепло от БПЛА выделяется в основном силовой установкой и в меньшей мере электронными компонентами, а также точками торможения на несущих краях крыльев, пропеллеров и винтов. Разработчики БПЛА стараются предупредить излучение в ИК-диапазоне в направлении размещенных на земле приемников и направить это излучение в сторону неба [3]. Кроме того, используют материалы с малой излучательной способностью. В данном случае возможность БПЛА быть обнаруженным определяется его излучательной способностью, контрастом и площадью излучения.

*Радиотехнический канал.* Поиск БПЛА с помощью активных радиолокационных станций (РЛС) достаточно продуктивный, так как они имеют относительно большой импульсный объем поиска и значительную дальность обнаружения [3]. Однако РЛС определяются противником по собственному излучению. Радиолокационное обнаружение БПЛА приемлемо только тогда, когда не ставятся требования к скрытности работы или высокой мобильности [3]. Как уже отмечалось, большинство БПЛА изготавливают из композитных материалов, которые достаточно плохо отражают электромагнитные волны. Радиоволны проникают через поверхность БПЛА и только частично отражаются от нее [3].

*Канал радиотехнической разведки.* БПЛА обнаруживаются средствами радиотехнической разведки путем приема и анализа радиосигналов линий связи и управления, радиолокационных высотометров, постановщиков активных помех и радиолокационных станций. Однако этим методом можно установить лишь направление на БПЛА, причем точность определения повышается при увеличении времени наблюдения. Некоторые низкочастотные линии связи обнаруживают на значительных дальностях. Излучение бортовых РЛС и постановка активных помех БПЛА могут быть обнаружены на еще больших дальностях. Этот метод требует минимального оборудования и позволяет быстро определить пеленг цели при дальнейшей выдаче целеуказаний на средства оптического или ИК-наблюдения [5].

Оценивая преимущества и недостатки рассмотренных физических каналов обнаружения БПЛА, можно сделать вывод, что для малоразмерных и малоскоростных БПЛА необходимо использовать комплексирование информации, которая поступает по каналам разной физической природы, или учитывать новые демаскирующие признаки, которые повышают эффективность обнаружения БПЛА.

По мнению автора, к ранее неучтенным демаскирующим признакам можно отнести возмущение воздушной среды, в частности изменение плотности и скорости воздушного потока, вызванного работой несущих винтов БПЛА. Воздух приближается к БПЛА со всех сторон, а отбрасывается винтовой системой только вниз. Суммарный импульс воздушных масс, приближающихся со всех сторон к винту, равен нулю, а импульс воздуха, прошедшего через плоскость вращения винта, направлен вниз. В соответствии с третьим законом Ньютона винт толкает воздух вниз, а воздух соответственно толкает винт вверх. Давление воздуха над винтовой системой меньше атмосферного, а ниже винтовой системы немного больше атмосферного. Воздушные потоки под винтовой системой будут узконаправленными и значительно скоростнее и протяженнее, чем воздушные потоки над винтовой системой. Воздушные потоки, прошедшие через винтовую систему, принято выражать через единицу давления. Возмущение воздушных потоков в каждом конкретном случае зависит от параметров работы несущего винта: мощности двигателя, числа оборотов винта, шага винта, диаметра винта, но общий характер возмущений остается таким же.

Обзор литературы показал, что для малоразмерных БПЛА используются двигатели со скоростью вращения 2500 об/мин и более. Тогда, проведя простые математические расчеты, можно показать, что частота вращения лопастей составляет 41,66 Гц, период обращения – 0,024 с, линейная скорость точки на лопасти винтовой системы будет зависеть от ее расположения: ближе к оси винтовой системы скорость будет меньше, чем на краю лопасти.

Следовательно, если иметь множество высокоточных метеорологических вышек, привязанных к определенной местности и объединенных в единую сеть, то при возмущении воздушной среды, вызванной работой винтовой системой БПЛА, данные с каждой вышки в режиме реального времени будут передаваться в единый центр обработки информации.

Анализируя информацию от метеорологических вышек о возмущении воздушной среды, можно будет определить траекторию движения БПЛА. Данное предложение является теоретическим и требует практической проверки.

## Список использованной литературы

1. Еремин Г.В., Гаврилов А.Д., Назарчук И.И. Малоразмерные беспилотники – новая проблема для ПВО // Армейский вестник. 2015 : сайт Министерства обороны Российской Федерации. URL: <http://armynews.ru/2015/02/malorazmernye-bes-pilotniki-novaya-problema-dlya-rvo/> (дата обращения: 13.02.2023).
2. Беспилотная авиация: терминология, классификация, современное состояние / В.С. Фетисов, Л.М. Неугодникова, В.В. Адамовский [и др.] ; под ред. В.С. Фетисова. Уфа : ФОТОН, 2014. 217 с.
3. Особенности обнаружения и распознавания малых беспилотных летательных аппаратов / В.М. Карташов, В.Н. Олейников, С.А. Шейко [и др.] // Радиотехника. 2018. № 195. С. 235–243. URL: [http://openarchive.nure.ua/bitstream/document/9513/1/Kartashov\\_235\\_243.pdf](http://openarchive.nure.ua/bitstream/document/9513/1/Kartashov_235_243.pdf) (дата обращения: 12.05.2023).
4. Соловьев В.А. Проблемы обнаружения беспилотных летательных аппаратов оптико-электронными устройствами // Электронный математический и медикобиологический журнал. 2011. Т. 10, Вып. 3. С. 1–13.
5. Макаренко С.И. Противодействие беспилотным летательным аппаратам : моногр. СПб. : Научное издание, 2020. 204 с.

---

*Пушкарёв Тимур Николаевич – преподаватель, каф. конструирования и производства радиоаппаратуры, Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, e-mail: timur.n.pushkarev@tusur.ru.*

### DETECTION OF SMALL UNMANNED AERIAL VEHICLES

*In recent years, the role of unmanned aerial vehicles (UAVs) has increased significantly, as they have become widely used in various industries. The constant improvement of performance characteristics has led to a decrease in weight and size indicators, in connection with this, the task of their detection has become more complicated. Currently, UAVs are actively used in military operations, the use of UAVs by the enemy creates a real military and terrorist threat, both for personnel and for critical infrastructure facilities. The level of this threat is becoming higher every day, due to the universal availability of technologies for the production and use of UAVs. Thus, the detection of the UAV is the first step in countering it.*

**Keywords:** UAV, UAV detection, radio navigation, air flow, pressure, speed

*Pushkarev Timur Nikolaevich – Lecturer, Department of Design and Production of Radio Equipment, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 634050, Tomsk, Lenin Ave., 40, e-mail: timur.n.pushkarev@tusur.ru.*

Г.А. Калашников, Д.Д. Зайков

## ДЕКОДЕР ВИТЕРБИ ДЛЯ СИСТЕМЫ СВЯЗИ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

*Представлены результаты программной реализации в MatLab декодера Витерби для декодирования сверточных кодов. Приведены результаты оценки зависимости вероятности битовой ошибки на выходе реализованного декодера от отношения энергии бита к спектральной плотности мощности.*

**Ключевые слова:** декодер Витерби, помехоустойчивость, сверточные коды, программная реализация

В рамках программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030» по подпроекту № 5 «Развитие систем обмена информацией для группы (роя) роботизированных аппаратов» стратегического проекта № 1 «Микроэлектроника и системы связи» требуется обеспечить канал связи между беспилотным летательным аппаратом (БПЛА) и базовой станцией (БС). Предполагается, что на БПЛА будет установлен модуль полезной нагрузки, при этом дальность связи с БС должна составлять до 100 км на высоте не менее 500 м, отношение сигнал/шум на входе приёмника не менее 10 дБ.

Для качественной связи при заданных требованиях по дальности необходимо использовать помехоустойчивое кодирование. Принято решение в качестве помехоустойчивого кодирования использовать сверточное, обладающее хорошей корректирующей способностью и простой технической реализации кодера.

Для декодирования сверточных кодов наиболее распространён алгоритм Витерби [1–5]. Преимущества алгоритма заключаются в его высокой эффективности и точности при восстановлении исходной последовательности даже при наличии большого количества ошибок. Он также обладает относительно низкой вычислительной сложностью, что делает его применимым в реальном времени. Декодирование сверточных кодов можно рассматривать как задачу нахождения кратчайшего пути по решетчатой диаграмме.

Задача декодирования с помощью декодера Витерби является новой, однако в публикациях были найдены лишь общие принципы построения программного алгоритма.

Поэтому принято решение разработать в программной среде MatLab (студенческая версия) декодер Витерби исходя из заданных требований к каналу связи между БПЛА и БС.

Рассмотрим алгоритм работы декодера Витерби с жёсткой схемой решения на примере кода «15,17» со скоростью кодирования  $R = 1/2$  (рисунок 1).

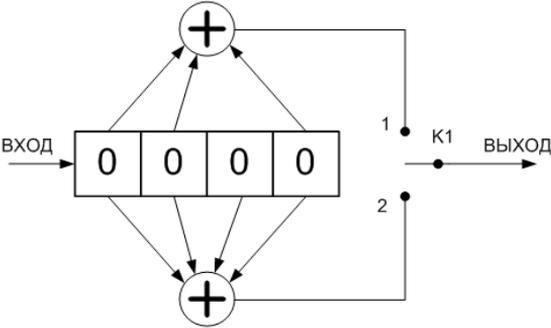


Рисунок 1 – Структурная схема сверточного кодера с порождающим полиномом «15,17»

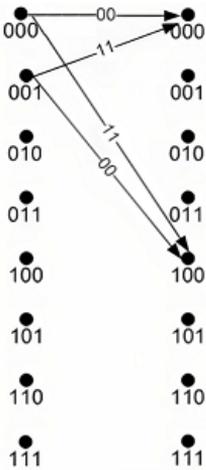


Рисунок 2 – Фрагмент решетчатой диаграммы

Реализованный программный модуль декодера Витерби содержит три блока: блок инициализации, блок декодирования, блок восстановления последовательности.

В блоке инициализации происходит формирование матрицы, в которой хранятся:

- предыдущее состояние кодера до подачи входного бита;
- состояние кодера на момент полученных на его выходе битов;
- выходные значения кодера.

Результатом является матрица, которая представляет фрагмент решетчатой диаграммы (рисунок 2).

На основе полученной матрицы в этом же блоке формируется матрица переходов между узлами, где каждому переходу из конкретного узла соответствует определенный входной бит (таблица 1).

Для удобства реализации фрагмент решётчатой диаграммы искусственно увеличен в два раза, так как каждому состоянию соответствуют два переходных узла. В результате номера в матрице переходов между узлами соответствуют начальному состоянию решётчатой диаграммы (см. рисунок 2), а при умножении номера строки на номер столбца получается значение, которое соответствует номеру переходного узла.

Таблица 1 – Матрица переходов между узлами

Номер строки	Номер столбца	
	1	2
1	1	3
2	5	7
3	9	11
4	13	15
5	2	4
6	6	8
7	10	12
8	14	16

Во втором блоке программы вычисляются все возможные значения метрик по матрице переходов, сформированной в предыдущем блоке. То есть в каждый момент времени происходит операция сложения по модулю два с входными дибитами и дибитами определенного узла, соответствующего данному моменту времени. После этого вычисляются значения минимальных метрик ветвей с учетом предыдущих метрик путей на каждом шаге, номера минимальных метрик хаотично записываются в матрицу.

Третий блок программы разделяется на два подблока. В первом подблоке осуществляется упорядоченность всех возможных путей на основе матрицы минимальных метрик, сформированной в предыдущем блоке. Метрики путей, у которых нет пар, являются тупиковыми. Второй подблок выбирает из всех возможных путей самый кратчайший, далее по номерам этого пути определяются биты, которые соответствуют предполагаемой закодированной последовательности.

На рисунке 3 представлены результаты расчета зависимости вероятности битовой ошибки (BER) на выходе реализованного декодера (с порождающим полинома «15,17») от величины отношения энергии бита к спектральной плотности мощности. Приведены значения BER, полученные с использованием встроенной в MatLab функции декодирования, и значения BER для сигнала без помехоустойчивого кодирования. В качестве сигнала использовался частотно-манипулированный сигнал с несущей частотой 2 ГГц при индексе модуляции 2. Помехой служила модель в виде белого гауссовского шума.

На рисунке 3 видно, что реализованный алгоритм декодера Витерби не уступает встроенному декодеру, который предлагает MatLab. При отношении  $E_b/N_0$ , равном 6–8 дБ, реализованный декодер имеет меньшую вероятность битовой ошибки, чем встроенный декодер.

Таким образом, разработанный алгоритм декодера Витерби с жестким решением позволит повысить помехоустойчивость канала связи между беспилотным летательным аппаратом и базовой станцией на 2 дБ.

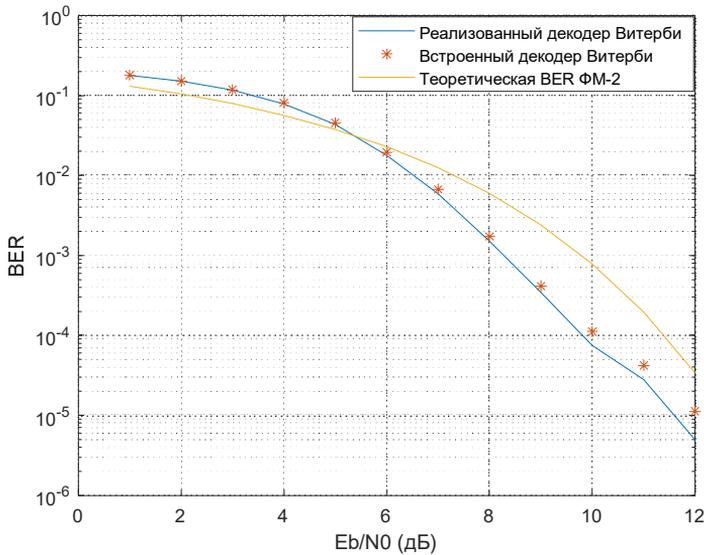


Рисунок 3 – Зависимости вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум

### Список использованной литературы

1. Скляр Бернارد. Цифровая связь: теоретические основы и практическое применение : учеб. пособие. М. : Вильямс, 2007. 1104 с.
2. Ширяев П.Я., Бернгардт А.С. Дидактический модуль декодер Витерби // Материалы XII Междунар. науч.-практ. конф. 2016. С. 142–143.
3. Кодирование и декодирование свёрточного кода по алгоритму Витерби. URL: <https://soltau.ru/index.php/en/themes/dev/item/598-kodirovanie-i-dekodirovanie-svjortochnogo-koda-po-algoritmu-viterbi> (дата обращения: 28.08.2023).
4. Воробьев А.А., Воробьев К.А., Негрозов Е.А. Сравнение различных вариантов реализации декодера Витерби для ПЛИС // Телекоммуникации и транспорт. 2011. № 11. С. 13–17.
5. Овечкин П.В. Программная реализация декодера Витерби с использованием массивно-параллельных вычислений // Материалы XXI Всерос. науч.-техн. конференции студентов, молодых ученых и специалистов. Рязанский гос. радиотехнический ун-т. 2016. С. 147–148.

---

*Калашников Герман Алексеевич – студент гр. 129, каф. радиотехнических систем, Томск. гос. ун-т систем упр. и радиозлектроники, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, e-mail: kalashnikov.g.129@e.tusur.ru.*

*Зайков Данила Денисович – студент гр. 129, каф. радиотехнических систем, Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, e-mail: zaykov.d.129@e.tusur.ru.*

#### **VITERBI DECODER FOR UAV COMMUNICATION SYSTEM**

*The results of the software implementation in MatLab of the Viterbi decoder for decoding convolutional codes are presented. The results of the probability of a bit error at the output of the implemented decoder from the value of the bit energy to the power spectral density are also given.*

**Keywords:** *Viterbi decoder, noise immunity, convolutional codes, software implementation*

*Kalashnikov German Alekseevich – student gr. 129, Department of Radioelectrical Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 634050, Tomsk, Lenin Ave., 40, e-mail: kalashnikov.g.129@e.tusur.ru.*

*Zaykov Danila Denisovich – student gr. 129, Department of Radiotechnical Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 634050, Tomsk, Lenin Ave., 40, e-mail: zaykov.d.129@e.tusur.ru.*

**УДК 621.396**

**Д.Д. Зайков, Г.А. Калашников**

#### **АНАЛИЗ МЕТОДОВ КРИПТОГРАФИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ КАНАЛА СВЯЗИ МЕЖДУ БЕСПИЛОТНЫМ ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТОМ И НАЗЕМНЫМ ПУНКТОМ УПРАВЛЕНИЯ**

*Рассмотрены методы защиты канала связи между беспилотным летательным аппаратом и наземным пунктом управления от наиболее вероятных угроз. Описаны ключевые моменты обеспечения безопасности, а также выявлены достоинства и недостатки каждого из методов.*

**Ключевые слова:** *БПЛА, НПУ, канал связи, передача данных, шифрование, защита, ключ, информационные данные, злоумышленник*

В настоящее время беспилотные летательные аппараты (БПЛА) набирают популярность, становятся все более распространенными и востребованными средствами воздушной техники. Они играют значительную роль в таких областях, как разведка, гражданская авиация, доставка грузов и многих других. Однако вместе с возрастающей популярностью БПЛА возникают новые риски безопасности, особенно

в отношении канала связи между этими аппаратами и наземным пунктом управления (НПУ).

Система связи между БПЛА и НПУ работает по двум направлениям:

- НПУ – БПЛА – передача данных управления;
- БПЛА – НПУ – передача данных телеметрии.

Помимо этого, БПЛА получает навигационные данные со спутников, что является дополнительным каналом связи.

Существует ряд уязвимостей канала связи и угроз для надежного функционирования БПЛА [1, 2].

Угрозы:

- радиоэлектронное подавление канала управления, перехват управления;
- подавление и подмена целевых сигналов с БПЛА;
- перехват и дешифрование полезной информации;
- навязывание ложной навигационной информации (спуфинг).

Уязвимости:

- потребность постоянного обмена информацией с НПУ;
- использование навигационной информации БПЛА;
- открытые потоки телеметрической информации;
- отсутствие или ограниченное использование средств криптографии.

Разработка метода защиты канала связи с БПЛА от перехвата информации злоумышленником является наиболее актуальной задачей.

Цель настоящей работы – провести анализ методов защиты канала связи между БПЛА и НПУ, выявить преимущества и недостатки используемых методов.

Для обеспечения безопасности от таких угроз, как перехват управления и подмена целевых сигналов, рассмотрим методы защиты информации с аутентификацией.

Немалое количество исследователей предлагают использовать имитовставку при обмене данными [3]. Имитовставка содержит определенные символы, которые добавляются к основному пакету данных. Такой метод защиты канала передачи данных очень прост в реализации, но имеет недостаток в виде дополнительной избыточности данных, что сказывается на скорости передачи информации. Избыточность растет с уменьшением объема передаваемых данных. Помимо этого, злоумышленник может отследить корреляцию передаваемых данных и выявить набор символов, используемых в качестве имитовставки.

Среди разработчиков также популярен метод защиты канала связи на основе использования электронно-цифровой подписи (ЭЦП). Так, авторы [4] предлагают использовать USB-ключ в качестве внешнего носителя ЭЦП, которая должна будет действовать как на БПЛА, так и на

НПУ. Метод подразумевает, что USB-ключ с ЭЦП содержит ключ для основной криптосистемы. Основной криптосистемой, описанной авторами, является RSA. Этот метод защиты от угроз подмены данных имеет существенный недостаток: при попадании БПЛА в руки злоумышленника все ЭЦП, находящиеся на USB-ключе, будут рассекречены. Достоинством метода является простота оснащения оборудования модулем с USB-ключом.

Из двух рассмотренных вариантов защиты канала связи от угроз подмены наиболее надежным и безопасным является метод с использованием ЭЦП в совокупности с основной криптозащитой (шифрованием), которая обеспечивает защиту от такой угрозы, как дешифрование полезной информации.

Среди всех возможных методов шифрования самые популярные – это шифр Вернама, RSA, 3DES, RC4, AES. Надежность перечисленных методов проверена как теоретически, так и практически.

Шифр Вернама, который относится к симметричным поточным синхронным шифрам, имеет теоретически доказанную абсолютную криптостойкость и высокую скорость шифрования. У него простой алгоритм, заключающийся в побитовом выполнении логической операции «исключающее ИЛИ» (XOR) над открытым текстом с помощью секретного ключа [5].

Недостатки шифра Вернама:

- одноразовое использование ключа;
- для обеспечения абсолютной криптостойкости не допускается перехват секретных ключей.

Шифр RSA является одной из первых криптосистем с открытым ключом, используемой для безопасной передачи данных. Асимметрия в RSA основана на практической трудности вычисления факториала произведения двух больших простых чисел (решение «задачи факторинга»). К достоинству метода относится его криптографическая стойкость, но RSA считается медленным алгоритмом. Кроме того, RSA может использоваться только для шифрования данных, размер которых не превышает размер его ключа.

Шифр DES – это алгоритм симметричного ключа, основанный на сети Фейстеля с 16 циклами (раундами). Ключ имеет длину 56 бит. Метод шифрования 3DES трижды использует шифр DES для шифрования своих данных, из-за чего процесс шифрования занимает много времени. К недостаткам данного метода относится то, что злоумышленник может расшифровать открытый текст с помощью дифференциального криптоанализа [6].

Метод шифрования RC4 – это потоковый шифр, который использует ключевое слово для генерации псевдослучайной последовательности битов, которая затем служит для шифрования данных. В RC4

применяется логическая операция «исключающее ИЛИ» (XOR) для шифрования данных. Для этого каждый байт данных преобразуется с помощью операции XOR с байтом из псевдослучайной последовательности. Основные преимущества шифрования методом RC4:

- высокая скорость работы;
- переменный размер ключа.

Недостатки метода [7]:

- невозможность реализации аутентификации;
- шифрование уязвимо для атаки с переключением битов.

Алгоритм AES (расширенный стандарт шифрования) представляет собой симметричный алгоритм блочного шифра и работает с группой битов фиксированной длины, которые называются блоками. AES может работать с тремя длинами ключей: 128, 192, 256 бит. Преимущества такого метода защиты канала связи:

- низкие требования к вычислительной мощности;
- криптостойкость к различным атакам.

Зашифрованные методом AES данные ни разу не были дешифрованы [8].

В борьбе со спуфингом криптографические методы бессильны. Для предотвращения этой угрозы необходимы другие методы обеспечения безопасности, не рассматриваемые в данной работе.

У всех приведенных методов криптографической защиты данных есть свои достоинства и недостатки. Из анализа современных методов защиты канала связи и требований к защищенности линии передачи информации между БПЛА и НПУ следует, что наиболее надежным является метод шифрования AES.

Метод шифрования AES позволит достичь большого количества возможных комбинаций ключей в зависимости от их размера, для дешифрования которых потребуется достаточно большое время (таблица 1).

Таблица 1 – Количество возможных комбинаций ключей шифра AES

Размер ключа, бит	Количество комбинаций	Время для дешифрования, с
128	$3,4 \cdot 10^{38}$	$1,02 \cdot 10^{18}$
192	$6,2 \cdot 10^{57}$	$1,87 \cdot 10^{37}$
256	$1,1 \cdot 10^{77}$	$3,31 \cdot 10^{56}$

Шифрование канала управления и передачи телеметрической информации с использованием метода AES является, по мнению авторов, наиболее оптимальным вариантом, сочетающим хорошую криптостойкость и высокую скорость шифрования.

## Список использованной литературы

1. Винокуров А.В. Анализ уязвимостей комплексов с беспилотными летательными аппаратами и классификация угроз безопасности циркулирующей в них информации. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-uyazvimostey-kompleksov-s-bespilotnymi-letatelnyimi-apparatami-i-klassifikatsiya-ugroz-bezopasnosti-tsirkuliruyushey-v-nih> (дата обращения: 23.05.2023).

2. Кулагин Г.И. Анализ проблем обеспечения безопасности беспроводных самоорганизующихся сетей на основе беспилотных летательных аппаратов // Политехнический молодежный журнал. 2022. № 03(68). URL: <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2022-03-779>.

3. Основы криптографии : учеб. пособие / А.П. Алферов, А.Ю. Зубов, А.С. Кузьмин [и др.]. М. : Гелиос АРВ. 2001. 480 с.

4. Пеев Д.Д., Панков К.Н., Власов А.В. Защита каналов управления беспилотных летательных аппаратов криптографическими методами. URL: <http://media-publisher.ru/wp-content/uploads/SINCHROINFO-4-2023.pdf> (дата обращения: 23.05.2023).

5. Авдонин И.А., Будько М.Б., Грозов В.А. Организация защиты данных, передаваемых между беспилотным летательным аппаратом и наземной станцией управления, на основе шифра Вернама // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16, № 5. С. 850–855. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-5-850-855.

6. AES против 3DES: разница и сравнение. URL: <https://askanydifference.com/ru/difference-between-aes-and-3des/> (дата обращения: 08.09.2023).

7. Что такое шифрование RC4. URL: <https://www.tutorialspoint.com/what-is-rc4-encryption-working-usage-advantages-and-disadvantages> (дата обращения: 08.09.2023).

8. Криптографы нашли способ взлома ключей AES-шифра. URL: <https://www.securitylab.ru/news/406880.php> (дата обращения: 08.09.2023).

---

*Калашников Герман Алексеевич – студент гр. 129, каф. радиотехнических систем, Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, e-mail: qxatner@gmail.com.*

*Зайков Данила Денисович – студент гр. 129, каф. радиотехнических систем, Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, e-mail: Z\_DanilA\_01@mail.ru.*

## ANALYSIS OF METHODS OF CRYPTOGRAPHIC PROTECTION OF THE COMMUNICATION CHANNEL BETWEEN AN UNMANNED AERIAL VEHICLE AND A GROUND CONTROL POINT

*The methods of protecting the communication channel between an unmanned aerial vehicle (UAV) and a ground control point (NPU) are considered. The key points of ensuring security are described, as well as the advantages and disadvantages of each of the methods are identified.*

**Keywords:** UAV, NPU, communication channel, data transmission, encryption, protection, key, information data, attacker

*Kalashnikov German Alekseevich – student gr. 129, Department of Radiotechnical Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 634050, Tomsk, Lenin Ave., 40, e-mail: qxamer@gmail.com.*

*Zaykov Danila Denisovich – student gr. 129, Department of Radiotechnical Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 634050, Tomsk, Lenin Ave., 40, e-mail: Z\_Danila\_01@mail.ru.*

УДК 621.396.96

Д.Д. Зайков, Г.А. Калашников, К.Д. Зайков

### МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ ПО РАБОТЕ С РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИЕЙ «РЕКА»

*Рассмотрены краткие теоретические сведения об основных характеристиках радиолокационной станции, приведены элементы и схемы отдельных устройств радиолокационной станции «Река», а также ключевые задания и контрольные вопросы для допуска к выполнению лабораторной работы. Методическое пособие станет ценным ресурсом для начинающих специалистов, занимающихся радиолокацией, а также для обучения и подготовки специалистов в данной области.*

**Ключевые слова:** радиолокационная станция, обнаружение, ширина спектра, сигнал, дальность, математическая модель, индикатор кругового обзора

Целью настоящей работы является описание методического пособия для получения практических навыков обучающимися в сфере радиолокации.

Радиолокационные станции (РЛС) обеспечивают решение широкого круга задач, связанных с обнаружением воздушных и наземных

объектов (целей), навигацией различных судов, управлением средствами противовоздушной обороны.

Под радиолокационной целью понимают любой материальный объект, который можно обнаружить, измерить его местоположение и параметры движения методами радиолокации [1].

Радиолокационные станции описываются основными тактическими и техническими характеристиками. Тактические характеристики РЛС – это система показателей, используемых для оценки их боевых возможностей и проведения тактических расчетов [2].

К основным техническим характеристикам радиосистемы относятся параметры, непосредственно определяющие ее тактические характеристики.

РЛС «Река» – это радар открытого типа, который устанавливается на небольших судах и яхтах [3]. Навигационная радиолокационная станция «Река» комплектуется сенсорным дисплеем. РЛС обеспечивает четкое и качественное обнаружение даже малых целей.

Структурная схема приемопередающего устройства РЛС представлена на рисунке 1.

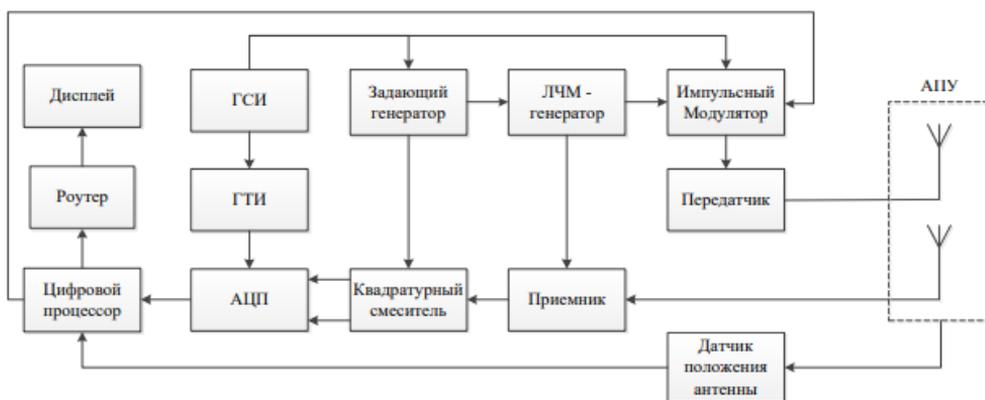


Рисунок 1 – Структурная схема радиолокационной станции «Река»

Локатор с легкостью определяет и разделяет цели, в том числе на близких расстояниях – менее 3 м. Все выводимые данные обновляются оперативно за счет высокой скорости вращения антенны – 24 об/мин.

Радиолокационная станция «Река» использует 6 типов квазинепрерывных сигналов с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ), выбор сигнала осуществляется в зависимости от требуемой дальности наблюдения.

Характеристики используемых в РЛС «Река» сигналов с линейной частотной модуляцией представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Типы излучаемых сигналов

Тип сигнала	Ширина спектра, МГц	Число передаваемых отсчетов	Число значимых отсчетов	Дальность максимального значимого отсчета, м	Разрешение по дальности, м
0	191,2	4096	3500	2750	~0,79
1	154,68	4096	3500	3400	~0,97
2	78,48	4096	3500	6700	~1,91
3	19,68	4096	3500	26750	~7,64
4	–	4096	3500	–	–
5	9,84	4096	3500	53500	~15,29

У сигналов с линейной частотной модуляцией частота несущего сигнала изменяется по линейному закону

$$f(t) = f_0 + \mu \cdot t,$$

где  $f_0$  – несущая частота сигнала;  $\mu$  – параметр, характеризующий скорость изменения частоты модулированного колебания.

Идея метода измерения дальности с помощью непрерывного/квазинепрерывного зондирующего излучения заключается в том, что используется частотная модуляция. Разница частот излученного и принятого сигналов при линейном законе изменения частоты пропорциональна дальности.

Задающий генератор формирует колебания несущей частоты, которые поступают на ЛЧМ-генератор, где формируется сигнал с линейной частотной модуляцией. ЛЧМ-сигнал поступает на импульсный модулятор, который формирует из непрерывного излучения квазинепрерывное. Полученный сигнал поступает в передатчик, где сигнал усиливается, фильтруется и передаётся на антенно-поворотное устройство.

Антенное устройство состоит из двух независимых линейных решёток, включающих по восемь одинаковых подрешёток, сигнально объединённых двумя СВЧ-сумматорами. Внешний вид приёмной и передающей антенн без радиопрозрачного экрана представлен на рисунке 2.



Рисунок 2 – Внешний вид приёмно-передающей антенны навигационной станции «Река»

Сигнал принимается антенной, поступает на вход приемника, где преобразуется в сигнал биений, усиливается и оцифровывается. В цифровом процессоре строится радиолокационное изображение, которое поступает на дисплей.

В качестве дисплея используется индикатор кругового обзора (ИКО) – оконечное звено РЛС [4].

Индикатор кругового обзора предназначен для воспроизведения на экране радиолокационного изображения надводной обстановки на основе информации, получаемой от приемопередатчика, лага и гирокомпас; измерения координат надводных объектов; решения задач безопасного расхождения судов.

Результатом настоящей работы является оглавление методического пособия, список заданий и список контрольных вопросов для выполнения лабораторной работы.

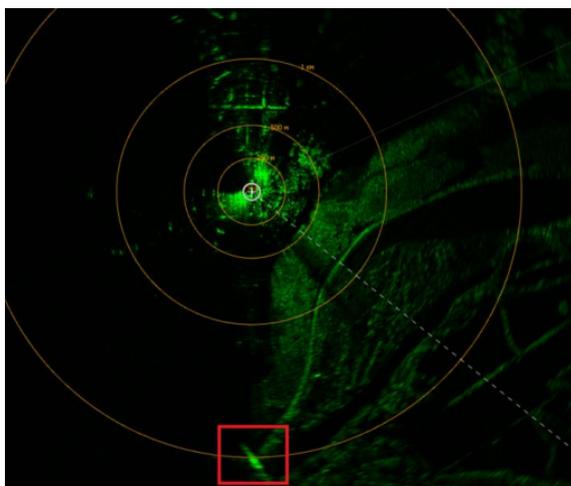
### **Оглавление методического пособия**

#### **Введение**

- 1. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ**
- 2. ОПИСАНИЕ РЛС «РЕКА»**
- 3. ИНДИКАТОР КРУГОВОГО ОБЗОРА**
- 4. ЗАПУСК ПРОГРАММЫ И ПОДГОТОВКА К РАБОТЕ**
- 5. ЗАДАНИЕ К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ**

#### **Задания**

1. Определите, что изображено в выделенной области на рисунке. Для этого соотнесите изображение РЛС с картой местности.



2. Приблизьте радиолокационное изображение в область сквера между корпусами РТК и ФЭТ, где находится скульптура «Древо

знаний». Подберите излучаемый сигнал так, чтобы получить наилучшее разрешение. Зафиксируйте номер сигнала. Объясните, почему данный сигнал обеспечивает наилучшее разрешение.

3. Численно оцените разрешающую способность РЛС по дальности с помощью изменения типа сигнала, оценку производите в области скульптуры.

4. Настройте тип сигнала на максимальную дальность действия. Рассмотрите радиолокационное изображение в пределах  $160^{\circ}$ – $170^{\circ}$ . По спектру сигнала биений (окно ИТА) найдите объект на расстоянии 8 км с явно большей ЭПР (блестящую точку). Зафиксируйте пеленг.

5. Найдите и соотнесите с картой местности остров «Басандайский».

6. Пронаблюдайте на разных типах сигнала движение машин по дороге на противоположном берегу реки Томи. Сделайте выводы.

7. Составьте отчёт, включив в него описание РЛС «Река», ход выполнения лабораторной работы, необходимые иллюстрации и выводы.

#### **Контрольные вопросы**

1. Радиолокация – это...
2. Виды радиолокации, в чем заключаются их основные преимущества?
3. Опишите импульсный метод измерения дальности до радиолокационных объектов.
4. Что такое радиолокационная станция?
5. Назовите основные технические характеристики РЛС.
6. Какие радиолокационные станции бывают?
7. Опишите работу частотного радиолокатора, приведите эюры.
8. Что такое ИКО, где используется, в чем его особенность?
9. Понятие ЭПР, как и зачем увеличивают ЭПР реальных объектов?
10. Что такое блестящие точки?

#### **Список использованной литературы**

1. Дудко Б.П., Денисов В.П. Радиотехнические системы : учеб. пособие. 2012. 334 с.
2. Дудко Б.П. Радионавигация : учеб. пособие. Томск : Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2003.
3. Микран. Навигационная радиолокационная станция РЕКА. URL: <https://www.micran.ru/productions/radiolocation/reka/> (дата обращения: 25.12.22).
4. Бакулев П.А. Сосновский А.А. Радиолокационные и радионавигационные системы : учеб. пособие для вузов. М. : Радио и связь, 1986.

---

*Калашников Герман Алексеевич – студент гр. 129, каф. радиотехнических систем, Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, e-mail: qxamer@gmail.com.*

*Зайков Данила Денисович – студент гр. 129, каф. радиотехнических систем, Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, e-mail: Z\_DanilA\_01@mail.ru.*

*Зайков Кирилл Денисович – мл. науч. сотрудник Научно-исследовательского института радиотехнических систем, аспирант, каф. радиотехнических систем, Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, e-mail: kirill.d.zailov@tusur.ru.*

### **METHODICAL MANUAL ON WORKING WITH THE RADAR STATION «RIVER»**

*This work is aimed at improving practical training in the educational process of students in the field of radar. Brief theoretical information about the main characteristics of the radar is considered, elements and diagrams of individual devices of the radar station «RIVER» are given, as well as key tasks and control questions for admission to laboratory work are given. The methodological manual will become a valuable resource for novice specialists engaged in radar, as well as for training and training specialists in this field.*

**Keywords:** *radar station, detection, spectrum width, signal, range, mathematical model, circular view indicator*

*Kalashnikov German Alekseevich – student gr. 129, palm. Radio Technical systems, Tomsk. State un-t system of control and radioelectronics, 634050, Tomsk, Lenin Ave., 40, e-mail: qxamer@gmail.com.*

*Zaykov Danila Denisovich – student gr. 129, Department of Radio Technical Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 634050, Tomsk, Lenin Ave., 40, e-mail: Z\_DanilA\_01@mail.ru.*

*Zaikov Kirill Denisovich – Junior Researcher, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 634050, Tomsk, Lenin Ave., 40, e-mail: kirill.d.zailov@tusur.ru.*

М.С. Никишкин, А.Н. Корягин, М.А. Турнаева

## ЦИФРОВОЕ УМНОЖЕНИЕ СИГНАЛА

*Исследуются цифровые методы обработки сигналов и сигналов тактирования. Представлены результаты умножения тактового сигнала методом периодической последовательности импульсов цифровых схем, сравнение уровней 9-й гармоники сигналов.*

**Ключевые слова:** генератор, спектр, преобразование сигнала, гармоники, умножение сигнала

Умножение частоты – это процесс получения колебаний с частотой, кратной частоте исходного колебания. Умножение частоты применяется в случае, если по каким-либо причинам невозможно получить колебание с требуемой частотой или при необходимости получить частоту колебаний, с точностью кратную определенной частоте [1].

Для работы современных цифровых схем часто применяются тактовые генераторы частотой от 0,1 до 25 МГц, однако если требуется увеличить скорость работы схемы посредством увеличения частоты тактового сигнала, то использование более дорогих генераторов не всегда является рациональным решением.

Метод получения кратных частот с помощью периодической последовательности импульсов (ППИ) основан на том, что в ее спектре уже имеются гармонические составляющие на кратных частотах сигнала, т. е. кратных первой гармонике. Поэтому входной сигнал необходимо преобразовать в меандр и из спектра выделить гармонику с требуемой частотой.

Рассмотрим три вариации умножения сигнала методом получения частот с помощью периодической последовательности импульсов, в которых используются:

- программируемая логическая интегральная схема (ПЛИС);
- ADCLK905 – сверхбыстрый буфер тактов;
- логические элементы.

В таблице 1 приведены общие характеристики выбранных микросхем [2–4].

Таблица 1 – Характеристики цифровых микросхем

Параметр	ПЛИС MAX II EPM570T100C5N	ADCLK905	SN74LCV
Макс. рабочая частота	304 МГц	7,5 ГГц	400 МГц
Ток потребления	30 мА	50 мА	50 мА
Напряжение питания	2,3–3,6 В	2,3–3,6 В	1,65–5,5 В

На каждой цифровой микросхеме из таблицы 1 были собраны испытательные образцы, принимающие на вход синусоидальный сигнал с фиксированной частотой и формирующие на выходе меандр с частотой входного сигнала (рисунок 1).

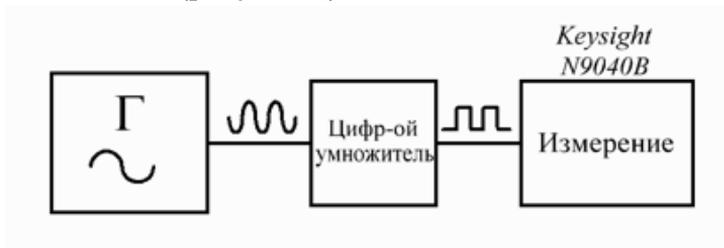


Рисунок 1 – Структурная схема эксперимента

Измерения проводились в одинаковых условиях на измерительном приборе Keysight N9040B с фиксированной частотой и мощностью синусоидального сигнала.

На рисунках 2–4 приведены спектры выходных прямоугольных сигналов с исследуемых цифровых схем. На всех графиках установлен дельта-маркер на 9-й гармонике относительно несущей гармоники сигнала.

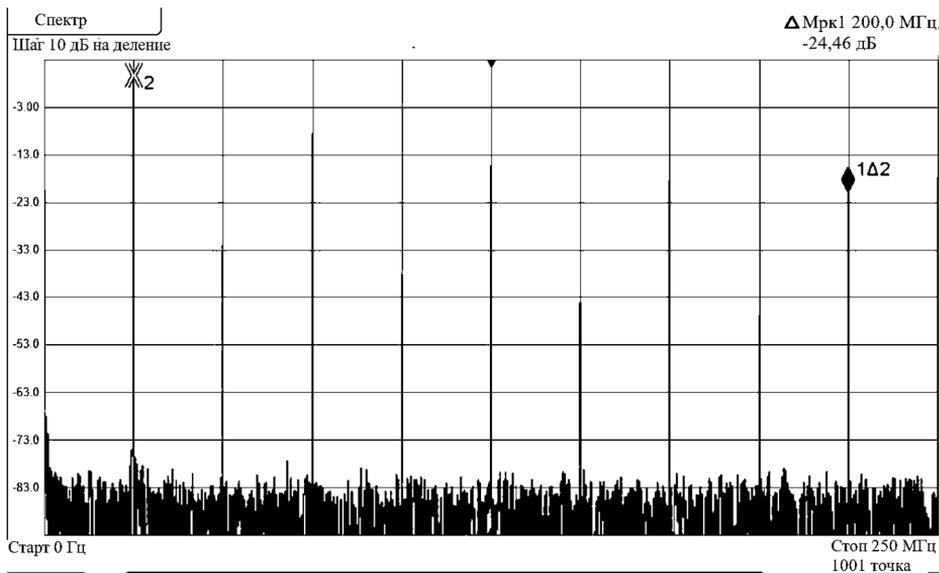


Рисунок 2 – Спектр выходного сигнала с цифрового умножителя на EPM570T100C5N

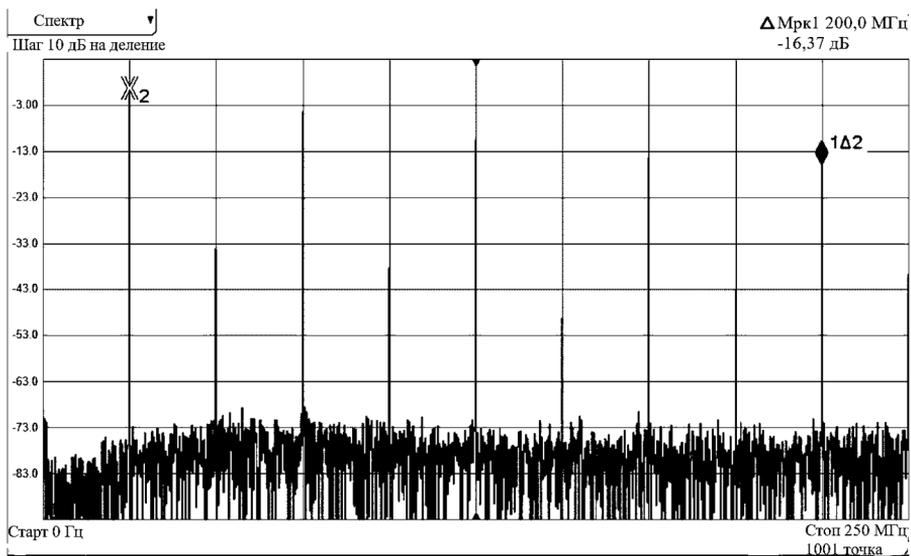


Рисунок 3 – Спектр выходного сигнала с цифрового умножителя на ADCLK905

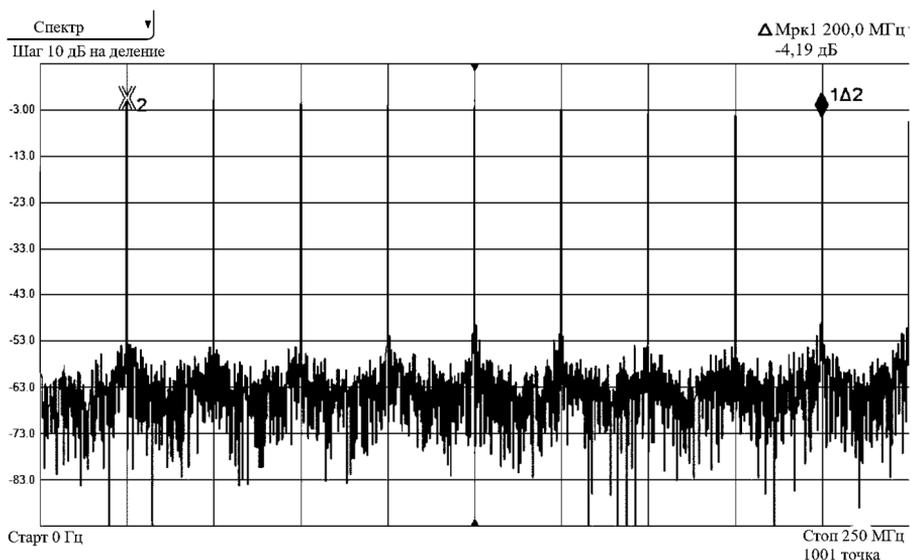


Рисунок 4 – Спектр выходного сигнала с цифрового умножителя на логических микросхемах SN74LVC

Исходя из полученных данных осциллограмм и спектров, умножитель, собранный на микросхеме стандартной логики серии SN74LVC, имеет значительно больший уровень 9-й гармоники сигнала относительно несущей частоты.

Умножитель сигнала на микросхеме стандартной логики имеет высокий относительный уровень как нечетных, так и четных гармоник.

Умножитель на ПЛИС показал самый низкий уровень 9-й гармоники относительно несущей частоты. Осциллограмма выходного сигнала данного умножителя имеет меандр с заполнением 50 %, поэтому в спектре сигнала уровень нечетных гармоник выше уровня четных гармоник.

Умножитель на микросхеме ADCLK905 аналогично умножителю на ПЛИС формирует выходной сигнал в виде меандра, но большей амплитуды, который за счет этого имеет больший уровень гармоник в спектре.

Также умножитель на ADCLK905 имеет преимущество в виде диапазона рабочих частот до 7,5 ГГц.

Умножитель на ПЛИС показал самый низкий уровень спектрального шума относительно двух других исследуемых умножителей, а умножитель на логических элементах – самый высокий уровень шума.

Следует отметить, что полученные уровни кратных гармоник могут не соблюдаться, так как длительности фронтов выходных сигналов цифровых элементов зависят от разновидности микросхемы, напряжения питания и температуры.

Таким образом, выполненное исследование показало, что можно увеличить частоту тактового сигнала с помощью простых цифровых микросхем без замены генератора и варьировать характеристики спектра выходного сигнала посредством изменения параметров схемы цифрового умножения. Большой интерес представляет способ умножения частоты, использующий цифровые микросхемы. Однако до сих пор не созданы умножители частоты с цифровым управлением, которые удовлетворяли бы современным требованиям.

Следовательно, требуется разработка цифруправляемых умножителей частоты на современной элементной базе с достаточно высокими техническими и метрологическими характеристиками.

### Список использованной литературы

1. Манассевич В. Синтезаторы частот. Теория и проектирование. М. : Связь, 1979. 383 с.
2. EPM570T100C5N Datasheet. URL: <https://datasheet.ciiva.com/26806/epm570t100c5n-26806630.pdf> (дата обращения: 20.01.2023).
3. ADCLK905 Datasheet. URL: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheetpdf/view/533834/AD/ADCLK905.html> (дата обращения: 21.01.2023).
4. SN74LCVC2G132 Datasheet. URL: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn74lvc2g132.pdf> (дата обращения: 25.01.2023).

---

*Никишкин Максим Сергеевич – аспирант, каф. радиоэлектроники и систем связи, Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 634045, г. Томск, ул. Вершинина, 47, e-mail: m.nikishkin@gmail.com.*

*Корягин Алексей Николаевич – аспирант, каф. радиоэлектроники и систем связи, Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 634045, г. Томск, ул. Вершинина, 47, e-mail: aleksej.koryagin@mail.ru.*

*Турнаева Маргарита Александровна – магистрант, каф. сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники, Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 634045, г. Томск, ул. Вершинина, 47, e-mail: zhukovamargarita2801@gmail.com.*

### DIGITAL SIGNAL MULTIPLICATION

*The object of research is digital methods of signal processing and clocking signals. The method of research is the characteristics of digital signal processing circuits. The article presents the results of multiplication of the clock signal by the method of periodic sequence of pulses of digital circuits, comparison of the levels of the 9th harmonic of signals.*

**Keywords:** *generator, spectrum, signal conversion, harmonics, signal multiplication*

*Nikishkin Maxim Sergeevich – postgraduate student, kaf. Radio Electronics and Communication Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics, 634045, Tomsk, Vershinina str., 47, e-mail: m.nikishkin@gmail.com.*

*Koryagin Alexey Nikolaevich – postgraduate student, kaf. Radio Electronics and Communication Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics, 634045, Tomsk, Vershinina str., 47, e-mail: aleksej.koryagin@mail.ru.*

*Turnaeva Margarita Aleksandrovna – Master's student, Department of Microwave and Quantum Radio Engineering, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 634045, Tomsk, Vershinina str., 47, e-mail: zhukovamargarita2801@gmail.com.*

П.А. Полянских, В.П. Денисов, А.А. Мещеряков

## ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ДАЛЬНОСТИ ДО ИСТОЧНИКА РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ПАССИВНОЙ ОДНОПОЗИЦИОННОЙ СИСТЕМОЙ

*Анализируется однопозиционный метод определения координат работающей радиолокационной станции (РЛС) по совокупности отражений радиоволн от элементов рельефа местности на трассе распространения радиоволн между РЛС и измерительным пунктом.*

**Ключевые слова:** ИРИ, однопозиционный метод, пассивная радиолокация, отражение сигналов, пеленг, РЛС

Важнейшей характеристикой РЛС является точность определения местоположения источника радиоизлучения (ИРИ), которая зависит от погрешностей измерения пеленга и дальности. Точность моноимпульсного пеленгования ИРИ на наземных трассах достаточно полно освещена в литературе, например [1, 2]. Поэтому сосредоточимся на точности измерения дальности предлагаемым методом (рисунок 1).

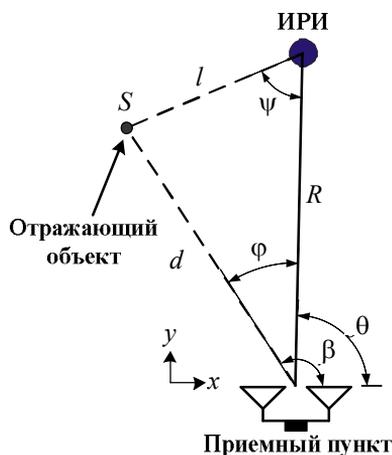


Рисунок 1 – Геометрия системы определения дальности

Для определения координат ИРИ достаточно вычислить дальность  $R$  до него, так как направление  $\theta$  определяется пеленгатором. Линия измеренного пеленга на ИРИ является первой линией положения. Вторая линия положения – эллипс, параметром которого является разность путей распространения прямого и отраженного сигналов

$$\Delta r = c\tau = d + l - R, \quad (1)$$

где  $c$  – скорость распространения радиоволн.

Если координаты отражающего объекта известны, то расстояние  $R$  от измерительного пункта до ИРИ можно определить по формуле

$$R = \frac{2d\Delta r - \Delta r^2}{2(\Delta r - d(1 - \cos \varphi))}. \quad (2)$$

С другой стороны, если известно расстояние  $R$  от измерительного пункта до ИРИ, координаты отражающего объекта можно найти по формулам [2]

$$x = \frac{(2R + \delta) \left( R + \frac{R + \delta}{\cos \alpha} \right)}{2(R^2 \sin^2 \alpha + 2R\delta + \delta^2)} \cos \alpha \cdot \sin \alpha, \quad (3)$$

$$y = \frac{\delta(2R + \delta) \left( R + \frac{R + \delta}{\cos \alpha} \right)}{2(R^2 \sin^2 \alpha + 2R\delta + \delta^2)} \cos^2 \alpha. \quad (4)$$

За оценку дальности принимается такое значение  $R$ , при котором разность между рассчитанными и заложенными в память компьютера координатами минимальна.

Поскольку в зоне действия приёмного пункта (пеленгатора) обычно имеется несколько или множество отражающих объектов, которые могут быть использованы для определения дальности  $R$ , формула для ее оценки приводится к виду

$$R = \arg \min_R \sum_{i=1}^N \left[ (x_i(R, \alpha_i, \delta_i) - x_{ni})^2 + (y_i(R, \alpha_i, \delta_i) - y_{ni})^2 \right]. \quad (5)$$

Дальность  $R$ , удовлетворяющая формуле (5), принимается за истинную. Формула (5) допускает различные алгоритмы практической реализации.

Погрешность однократного измерения дальности (то есть по одному действительному отражателю) зависит от следующих факторов:

1) погрешности определения положения отражающих объектов на местности относительно приемного пункта (однопозиционного дальномера);

2) погрешности определения задержки отраженного импульса относительно прямого. Соответствующая погрешность складывается из погрешности измерительной аппаратуры и искажений прямого и отраженного импульсов на трассе распространения радиоволн;

3) погрешности определения пеленга на отражающий объект относительно источника излучения. Соответствующая погрешность также складывается из инструментальной погрешности пеленгатора и составляющей, связанной с характером отражений радиоволн от объекта с учетом прохождения трассы распространения.

Не вдаваясь в подробности возникновения погрешностей измерений, рассмотрим, как погрешность определения дальности зависит от погрешностей измерений пеленгов и временной задержки. Используя формулу (5) и рисунок 1, свяжем погрешность измерения дальности  $\Delta R$  с погрешностями измерения пеленгов  $\Delta\varphi$  и разности длин путей прямого и отраженного сигналов  $\Delta(\Delta r)$ .

Полагаем, что координаты отражающего объекта известны, а угол  $\varphi$  можно определить по результатам измерений углов  $\theta$  и  $\beta$  как:

$$\varphi = |\theta - \beta|. \quad (6)$$

Каждому переотраженному сигналу ИРИ соответствует свое значение пеленга  $\varphi$  и задержки  $\tau$  относительно прямого сигнала. Измерив задержку сигнала от отражающего объекта с известными координатами, дальность  $R$  до ИРИ можно рассчитать по формуле

$$R = 2d\Delta r - \Delta r^2 / 2(\Delta r - d(1 - \cos\varphi)), \quad (7)$$

где  $\Delta r = c\tau$ .

Преобразуем выражение (7) к виду

$$\Delta r = d + \sqrt{d^2 + R^2 - 2dR \cos\varphi} - R, \quad (8)$$

где  $\Delta r$  – разность длин путей прямого и отраженного сигналов.

Решив уравнение (8) относительно  $R$ , получим простое выражение для определения дальности до ИРИ (2).

Отсюда получим

$$\Delta R = \left( \frac{dR}{d\varphi} \right) \Delta\varphi + \frac{dR}{d(\Delta r)} \Delta(\Delta r). \quad (9)$$

Найдем частную производную по  $\varphi$ :

$$\frac{dR}{d\varphi} = \frac{d\Delta r (2d - \Delta r) \sin\varphi}{2[\Delta r - d(1 - \cos\varphi)]^2} = \frac{dR \sin\varphi}{\Delta r - d(1 - d \cos\varphi)}. \quad (10)$$

Найдем частную производную по  $\Delta r$ :

$$\frac{dR}{d(\Delta r)} = \frac{2d(\Delta r - d)(1 - \cos \varphi) - (\Delta r)^2}{2(\Delta r - d(1 - \cos \varphi))^2} = \frac{R[2d(\Delta r - d)(1 - \cos \varphi) - \Delta r^2]}{\Delta r(\Delta r - d(1 - \cos \varphi))(2d - \Delta r)}. \quad (11)$$

Так как погрешность измерения дальности зависит от самой дальности, представим ее в относительных единицах. Используя формулы (9)–(11), переходя к среднеквадратичным значениям и считая погрешности измерения пеленгов и временных задержек статистически независимыми, будем иметь

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_R^2}{R^2} &= \frac{\sigma_{R_\tau}^2}{R^2} + \frac{\sigma_{R_\alpha}^2}{R^2} = \\ &= \left( \frac{d \sin \varphi}{\Delta r - d(1 - \cos \varphi)} \right)^2 \sigma_\varphi^2 + \left( \frac{2d(\Delta r - d)(1 - \cos \varphi) - \Delta r^2}{\Delta r(\Delta r - d(1 - \cos \varphi))(2d - \Delta r)} \right)^2 \sigma_{\Delta R}^2, \end{aligned} \quad (12)$$

где  $\sigma_\varphi^2$  – дисперсия разности пеленгов на ИРИ и отражающий объект;  $\sigma_{\Delta R}^2 = c\tau_3^2$  – дисперсия разности расстояний;  $\sigma_{R_\tau}^2$  – составляющая дисперсии оценки дальности за счет неточного измерения задержки;  $\sigma_{R_\alpha}^2$  – составляющая дисперсии оценки дальности за счет неточного измерения пеленгов [3, 4].

Результаты расчета зависимостей составляющих ошибки определения дальности до ИРИ от ошибки определения задержки и ошибки определения пеленга (10), (11) представлены на рисунках 2 и 3 соответственно. Рисунки получены при различных положениях отражателя. Каждая кривая соответствует заданному угловому положению отражателя относительно прямой трассы приемник – ИРИ. На рисунках дробью показано положение отражателя: в числителе – его угловое положение с позиции приемника относительно линии приемник – ИРИ, в знаменателе – расстояние до него по отношению к дистанции до ИРИ.

Среднеквадратическая погрешность измерения дальности  $\sigma_R$  и среднеквадратическая погрешность измерения времени запаздывания  $\sigma_\tau$  связаны между собой соотношением

$$\sigma_R = \alpha \cdot c \cdot \sigma_\tau, \quad (13)$$

где  $c$  – скорость распространения радиоволн;  $\alpha$  – коэффициент, зависящий от положения отражателя относительно линии приемный

пункт – ИРИ, который принимает значения от 1 до 20. Если предположить, что инструментальная погрешность измерения временного запаздывания равна двум интервалам временного квантования в экспериментальном комплексе (10 нс), то соответствующая погрешность измерения дальности не превосходит 120 м.

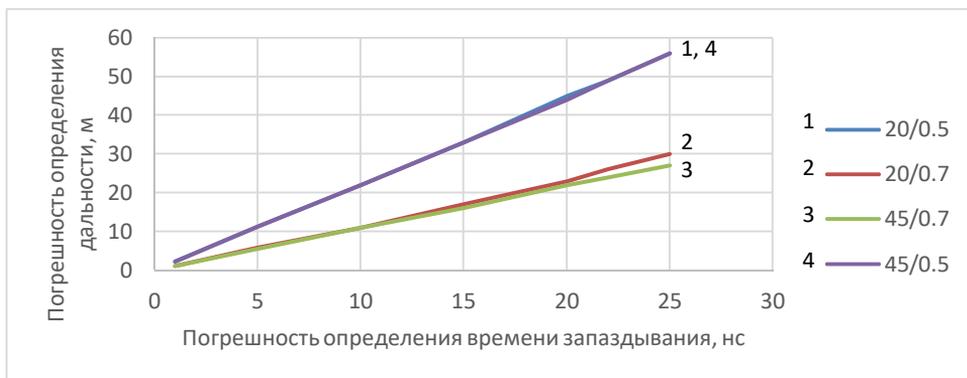


Рисунок 2 – Зависимость ошибки определения дальности до источника радиоизлучения от ошибки определения времени запаздывания

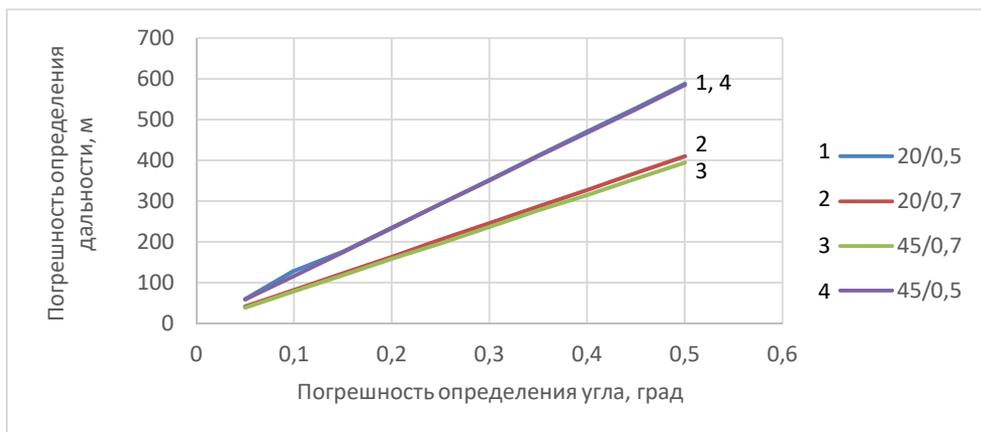


Рисунок 3 – Зависимость ошибки определения дальности до источника радиоизлучени от ошибки пеленгования

Перейдем к оценке влияния погрешностей пеленгования. Предположим, что в используемом двухбазовом фазовом пеленгаторе аппаратная погрешность измерения разности фаз составляет  $10^\circ$ , что существенно больше, чем заявляется производителем аппаратуры [2]. Тогда погрешность пеленгования ИРИ, расположенного под углом  $60^\circ$  относительно направления приемный пункт – ИРИ на малой базе

( $l = 18$  см) на волне  $\lambda = 3$  см составит приблизительно  $0,5^\circ$ . На большой базе ( $l = 90$  см) погрешность составит около  $0,1^\circ$ . Если использовать большую базу, то погрешность измерения дальности за счет неточного пеленгования будет сопоставима с погрешностью за счет неточного измерения временной задержки.

Таким образом, декларированная точность используемой аппаратуры позволяет производить оценку точности до источника излучения при протяженности трассы ИРИ – приемник 18 км с относительной погрешностью, не превышающей 1%.

### Список использованной литературы

1. Денисов В.П. Пространственно-временные искажения сантиметровых радиосигналов на наземных трассах распространения и их влияние на точность пассивных систем местоопределения : моногр. / под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. В.П. Денисова. Томск : Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2014. 502 с.

2. Однопозиционный метод определения координат источника радиоизлучения на земных трассах по совокупности отражений его сигнала от местных предметов / П.А. Полянских, А.А. Мещеряков, В.П. Денисов [и др.] // Журнал радиоэлектроники. 2021. № 8.

3. Полянских П.А., Мещеряков А.А. Оценка точности определения координат наземного источника радиоизлучения с борта летательного аппарата пассивным однопозиционным методом путем компьютерного моделирования // Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР-2019», г. Томск. 2019. Т. 1, № 1-1. С. 46–49.

4. Полянских П.А., Мещеряков А.А. Оценка некоторых характеристик импульсов, отраженных от элементов рельефа при двухпозиционной радиолокации на земных трассах // Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР-2021» : сб. избранных статей научной сессии ТУСУР, г. Томск, 19–21 мая 2021 г. : в 3 ч. Томск : В-Спектр, 2021. Ч. 1. С. 28–31.

---

*Полянских Петр Андреевич – ст. преподаватель, каф. радиотехнических систем, Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, e-mail: polyanskix@gmail.com.*

*Денисов Вадим Прокопьевич – д-р техн. наук, проф., каф. радиотехнических систем, Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, e-mail: dvp15@sibmail.com.*

*Мещеряков Александр Александрович – зав. каф. радиотехнических систем, Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, e-mail: msch@rts.tusur.ru.*

**ACCURACY OF MEASURING RANGE TO A RADIO SOURCE  
WITH A PASSIVE SINGLE-POSITION SYSTEM**

*The analysis is carried out in relation to a single-position method for determining the coordinates of an operating radar based on a set of reflections of radio waves from terrain elements along the radio wave propagation path between the radar and the measuring point.*

**Keywords:** *IRI, single-position method, passive radar, signal reflection, bearing, radar*

*Polyanskikh Petr Andreevich – senior lecturer, Department of Radio Engineering Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 634050, Tomsk, Lenin Ave., 40, e-mail: polyanskix@gmail.com.*

*Denisov Vadim Prokopyevich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Radio Engineering Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 634050, Tomsk, Lenin Ave., 40, e-mail: dup15@sibmail.com.*

*Meshcheryakov Alexander Aleksandrovich – Head of the Department of Radio Engineering Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 634050, Tomsk, Lenin Ave., 40, e-mail: msch@rts.tusur.ru.*

## Секция 3. СЕТИ И СИСТЕМЫ СВЯЗИ

---

УДК 330.101.8

Е.С. Акельев, А.А. Демин

### ОРГАНИЗАЦИЯ БЕЗОПАСНОГО УДАЛЕННОГО ДОСТУПА ПРИ ПОМОЩИ ВИРТУАЛЬНОЙ ЧАСТНОЙ СЕТИ ДЛЯ РАБОТЫ ИТ-БИЗНЕСА В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ ЦИФРОВИЗАЦИИ ФИНАНСОВО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ

*Развитие передовых информационных технологий обеспечивает качественно новый уровень инфраструктурных возможностей для ведения ИТ-бизнеса, благодаря чему появляются не только новые возможности, но и современные угрозы утечки информации. Организация безопасного удаленного доступа при помощи виртуальной частной сети (VPN) становится одним из современных решений в сфере технологий доверенного взаимодействия.*

**Ключевые слова:** виртуальная частная сеть, безопасный удаленный доступ, технологии доверенного взаимодействия, безопасность, цифровизация, VPN-протокол

Современные информационно-телекоммуникационные технологии предоставляют новые инфраструктурные возможности для ведения ИТ-бизнеса, такие как значительное удобство в локации, более рациональное и эффективное использование ресурсов за счет минимизации транзакционных издержек и экономии на структурных подразделениях, бóльшая доступность товаров и услуг за счет интеграции с глобальном рынком, а также повышение эффективности производства вследствие увеличения его масштабов при фиксированных издержках, когда возможно копировать цифровую информацию большое количество раз, а высокая скорость передачи информационных потоков существенно влияет на ускорение и автоматизацию бизнес-процессов в целом.

Развитие информационно-телекоммуникационной инфраструктуры привело к формированию процесса цифровизации финансово-экономических операций и в целом к созданию виртуальной цифровой экономической среды, где происходит замещение реальных рыночных институтов виртуальными моделями, преобладает производство услуг с информационной составляющей и знаниеемкими ресурсами, создаются виртуальные торговые площадки и сети, а также происходит процесс замещения традиционных форм валютно-финансовых операций цифровыми инструментами и криптовалютными операциями. Виртуальные

технологии (информационные, компьютерные) способствуют созданию особого виртуального пространства, где и совершаются виртуальные экономические операции. Цифровизация финансово-экономических операций приводит к снижению возможностей государственного регулирования экономики и переходу к ее саморегулированию, что, с одной стороны, повысит ее эффективность, а с другой стороны, потребует обеспечить безопасность цифровых операций IT-бизнеса.

По мере роста коммерциализации киберпространства, увеличения гибкости и динамичности IT-компаний, изменения условий конкурентоспособности в цифровой среде существенно повышаются требования к безопасности IT-бизнеса. Одним из решений этой проблемы становится организация безопасного удаленного доступа при помощи виртуальной частной сети (Virtual Private Network – VPN) [1–24].

**Обоснование проблемы.** Современные компании при осуществлении экономической деятельности полностью либо частично используют удаленную схему безопасного доступа с некоторыми из своих сотрудников. Чтобы у всех сотрудников была возможность подключения к корпоративным ресурсам, требуется защита этого подключения с помощью VPN. По результатам ежегодного исследования Cost of a Data Breach Report, проведенного Ponemon Institute при спонсорской и аналитической поддержке IBM Security, 20 % организаций, принявших участие в исследовании, отметили, что дистанционный режим работы стал одной из причин утечек данных, которые обошлись организациям в \$4,96 млн. Некоторые изменения в сфере IT во время пандемии увеличили стоимость утечек данных, однако организации, которые не стали модернизировать свой бизнес, на самом деле несут более высокие расходы, связанные с утечками. В организациях, не начавших цифровую трансформацию в связи с COVID-19, ущерб от одной утечки оказался на \$750 тыс. выше, чем средний по всем организациям (на 16,6% выше среднего).

**Цель исследования.** Описать наиболее оптимальную систему защиты виртуальной частной сети для IT-бизнеса при организации его безопасного удаленного доступа в условиях цифровизации финансово-экономических операций.

**Описание и обоснование методов исследования.** Теоретические методы исследования сводятся к описанию виртуальной частной сети как расширению для публичной сети, позволяющей имитировать еще одну сеть поверх уже существующей, к которой может подключаться ограниченное количество устройств. В этой связи существуют три основных типа VPN:

1) VPN удаленного доступа, которая состоит из клиентов, подключающихся к компании с удаленных устройств, использующих интернет

в качестве канала доступа. После аутентификации они имеют статус, аналогичный тому, который необходим в локальной сети;

2) VPN типа «точка – точка». Эта схема используется для подключения удаленных офисов к центральной штаб-квартире. Сервер VPN постоянно подключен к интернету, принимает входящие соединения с сайтов и создает VPN-туннель. Серверы подключены из удаленных офисов к интернету, а через него к VPN-туннелю в центральном офисе. Он используется для устранения традиционных туннелей типа «точка – точка»;

3) внутренняя VPN (over LAN). Она работает как обычная VPN, если находится в той же локальной сети, а не в сети интернет, и служит для выделения областей и услуг внутренней сети, а также для повышения безопасности в беспроводной сети Wi-Fi.

Именно первый тип VPN больше всего подходит для организации безопасного удаленного доступа.

VPN-протокол – программный фундамент, на базе которого строится любой VPN-сервис. В нем описывается формат организации подключения, обмена данными внутри частной виртуальной сети и другие аспекты работы программного обеспечения. От выбора протокола зависит, какие задачи с его помощью будут решены, насколько эффективно они будут решаться, насколько это будет безопасно, быстро и т.п. Существует несколько технологий организации VPN, поэтому возникают некоторые разногласия при выборе соответствующих сервисов и настройке виртуальных частных сетей. У каждого протокола свой набор характеристик.

- Поддерживаемые платформы – протоколы могут быть достаточно специфичны и функционировать исключительно на одной-двух операционных системах (ОС). Другие поддерживают сразу все доступные ОС.

- Поддерживаемые сети – не все протоколы работают в идентичных сетях. Некоторые VPN-сервисы предлагают свои услуги только в конкретных странах ввиду технологических ограничений, введенных в том числе государственными органами.

- Скорость работы – зависит от архитектуры протокола. Одни быстрее передают данные на мобильных устройствах, другие показывают пиковую производительность только в масштабах больших корпоративных сетей.

- Безопасность – в протоколах по-разному реализовано шифрование и другие механизмы обеспечения безопасности данных. Поэтому в зависимости от поставленных задач надо выбирать технологию, наименее подверженную распространенным атакам.

Существуют различные виды VPN-протоколов для удаленного доступа.

1. Point-to-Point Tunneling Protocol (PPTP). Это туннельный протокол типа точка – точка (узел – узел), позволяющий компьютеру устанавливать защищенное соединение с сервером за счет создания туннеля в незащищенной сети. PPTP помещает (инкапсулирует) кадры PPP в IP-пакеты для передачи по глобальной IP-сети, например интернет. PPTP может также использоваться для организации туннеля между двумя локальными сетями. PPTP использует дополнительное TCP-соединение для обслуживания туннеля.

2. IP Security (IPSec). Представляет собой набор стандартов безопасности для протокола IP и действует на сетевом уровне, обеспечивая защиту и аутентификацию IP-пакетов между компьютерами в сети. Он обеспечивает конфиденциальность, целостность и аутентификацию с помощью алгоритмов шифрования, хэширования, открытых ключей и цифровых сертификатов.

3. VPN на основе SSL. Предназначен для безопасного предоставления корпоративных сетевых услуг любому авторизованному пользователю, который получает возможность удаленного доступа к корпоративным ресурсам из любой точки мира, где имеется интернет и стандартный веб-браузер.

4. OpenVPN. Сбалансированный вариант. Это свободная реализация технологии виртуальной частной сети с открытым исходным кодом для создания зашифрованных каналов типа точка – точка или сервер – клиенты между компьютерами. Он быстрее остальных и гораздо меньше подвержен атакам со стороны злоумышленников. Топовые VPN-сервисы базируют свои продукты на основе этого протокола.

Сравнительный анализ протоколов показал, что фаворитом является OpenVPN. Он уже давно на рынке, работает на Android, iOS, Windows, macOS, Linux и даже на роутерах. Скорость работы OpenVPN хоть и не поражает, но ее хватает для комфортной работы. VPN-протокол подходит для любых случаев: когда нужно обезопасить интернет-подключение, будь то онлайн-игры, использование торрентов или анонимное информирование.

Практическое исследование показывает, что дает VPN бизнесу.

1. Дополнительный слой защиты. Для бизнеса надежная киберзащита – основа нормальной работы. И чем крупнее компания, тем больше средств защиты приходится внедрять, поскольку последствия взлома становятся крайне критичными и очень дорогими. VPN обеспечивает дополнительный уровень защиты. Эта технология шифрует абсолютно все данные, передаваемые по подключенному к частной сети каналу связи. Шифрование обеспечивает безопасность хранимых документов, каналы связи с клиентами, внутреннюю коммуникацию и т.п.

VPN позволяет менять IP подключившегося устройства, будь это телефон, планшет, компьютер или что-то еще. Соответственно киберпреступники не имеют возможности отслеживать пользователей VPN-сервисов.

2. Подключение к корпоративной сети из любого места. Современные компании либо частично используют удаленную схему работы с некоторыми своими сотрудниками, либо вовсе не имеют реального офиса, предпочитая ему виртуальный. Чтобы у всех сотрудников была возможность подключения к корпоративным ресурсам, требуется защита этого подключения с помощью VPN. Раньше организовать подобную схему работы было довольно сложно технологически, поскольку приходилось модифицировать конфигурационные файлы, использовать кастомное программное обеспечение. Сейчас все настраивается в автоматическом или полуавтоматическом режиме. При необходимости каждый сотрудник может получить собственный защищенный IP-адрес. Сказанное применимо для бизнеса любого размера.

3. Доступ к заблокированным ресурсам и сервисам. Сейчас во многих государствах запрещены некоторые сервисы и сайты. Используя VPN, можно получить IP любого региона мира и забыть о цензуре.

4. Снижение расходов. Чтобы обеспечить уровень защиты внутри компании, который дает бизнес-VPN, нужно довольно много средств и времени. Кроме того, нужны специалисты, которые способны все настроить. Если воспользоваться облачным VPN, все будет работать в автоматическом режиме. Необходимость привлекать для этого собственного системного администратора сведена к минимуму. Еще один важный фактор – «цена» взлома и ликвидации его последствий.

5. Безопасность для клиентов. Доступ своим клиентам к WiFi предоставляют многие компании. Отели, рестораны, кафе, аэропорты – интернет есть практически везде. Но чем больше публичная сеть, тем она опаснее. Если клиент организации решил войти в свою учетную запись и ввел все данные доступа, а канал связи не защищен, то учетная запись может быть скомпрометирована и у компании будут репутационные потери. Угроза может быть не только внешней, но и внутренней, ведь администратор открытой WiFi-сети может собирать любые данные, которые проходят через точку доступа. Если использовать VPN на пользовательских устройствах, то администратор не сможет получить персональные данные подключенных к точке доступа клиентов.

#### **Результаты исследования и авторские предложения по их практическому применению**

1. Показана необходимость обеспечения современного уровня безопасности для цифрового пространства ведения бизнеса. Шифрование VPN гарантирует, что трафик между системами не может быть деко-

дирован злоумышленником и конфиденциальные данные не могут быть проанализированы.

2. Аутентификация пользователя и системы представляет собой двухкомпонентную защиту. Первый компонент – правила данных пользователей можно согласовать, например правила о конкретных маршрутах, правила брандмауэра или других скриптов и утилит. Они уникальны для каждого экземпляра, но для каждого из них можно провести настройку, если используется OpenVPN. Второй компонент аутентификации – дополнительная защита для потока связи. В этом случае способ подписи каждого отправленного пакета является установленным.

3. Установлено, что каждая система проверяет, правильно ли подписаны полученные VPN-пакеты до расшифровки данных. Путем аутентификации пакетов, которые находятся в зашифрованном виде, система может сэкономить время обработки, не расшифровывая пакеты, которые не соответствуют правилам аутентификации. Такая аутентификация защищает от атак типа «Denial of Service», а также предотвращает «Man in the Middle» при условии, что ключи подписи хранятся в безопасном месте.

4. Проанализированы протоколы VPN и их роль в защите сети.

5. Выявлены преимущества OpenVPN, которыми являются простота установки конфигурации, возможность установки в ограниченных сетях, включая сети NAT. Кроме того, OpenVPN включает в себя функции безопасности, в том числе аппаратную маркерную защиту и поддержку механизма аутентификации различных пользователей.

### Список использованной литературы

1. Иванов М.А. Криптографические методы защиты информации в компьютерных системах и сетях. М. : КУДИЦ-ОБРАЗ, 2001. 368 с.

2. Кульгин М. Технологии корпоративных сетей. Энциклопедия. СПб. : Питер, 2000. 704 с.

3. Олифер В.Г., Олифер Н.А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы : учеб. для вузов. СПб. : Питер, 2001. 672 с.

4. Романец Ю.В., Тимофеев П.А., Шаньгин В.Ф. Защита информации в компьютерных системах и сетях. 2-е изд. М. : Радио и связь, 2002. 328 с.

5. Столлингс В. Основы защиты сетей. Приложения и стандарты = Network Security Essentials. Applications and Standards. М. : Вильямс, 2002. С. 432. ISBN 0-13-016093-8.

6. Что такое VPN?. URL: <https://technet.microsoft.com/ru-ru/library/cc731954%28v=ws.10%29.aspx> (дата обращения: 06.11.2021).

7. Что такое VPN? . URL: [http://kb.netgear.ru/app/answers/detail/a\\_id/22363/](http://kb.netgear.ru/app/answers/detail/a_id/22363/) (дата обращения: 06.11.2021).
8. Википедия – VPN. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/VPN> (дата обращения: 06.11.2021).
9. Построение безопасных сетей на основе VPN. URL: <http://www.aitishnik.ru/seti/postroenie-bezopasnich-setey-na-osnove-vpn.html> (дата обращения: 06.11.2021).
10. Виртуальные частные сети. URL: <http://it-sektor.ru/virtualnye-chastnye-seti.html> (дата обращения: 06.11.2021).
11. VPN. URL: <http://www.cisco.com/web/RU/products/sw/netmgtsw/ps2327/index.html> (дата обращения: 06.11.2021).
12. Методы анонимности в сети. URL: <http://habrahabr.ru/post/204266/> (дата обращения: 06.11.2021).
13. Семь популярных VPN-сервисов. URL: <http://www.computerra.ru/129276/sem-populyarnyih-vpn-servisov/> (дата обращения: 06.11.2021).
14. Инструкция по настройке VPN-соединения для Windows 7. URL: <http://www.tomtel.ru/tariffsandconnection/vpn/vpnconf7.html> (дата обращения: 06.11.2021).
15. Создание VPN-подключения. URL: <https://technet.microsoft.com/ru-ru/library/cc726062%28v=ws.10%29.aspx> (дата обращения: 06.11.2021).
16. Туннельные протоколы VPN. URL: <https://technet.microsoft.com/ru-ru/library/cc771298%28v=ws.10%29.aspx> (дата обращения: 06.11.2021).
17. Максимов Н.В., Попов И.И. Компьютерные сети : учеб. пособие. М. : Форум, 2017. 193 с.
18. Богданов-Катьков Н.В., Орлов А.А. Интернет: Новейший справочник. М. : Эксмо, 2015. 56 с.
19. Бузов Г.А. Защита информации ограниченного доступа от утечки по техническим каналам. М. : ГЛТ, 2016. 100 с.
20. Емельянова Н.З., Партыка Т.Л., Попов И.И. Защита информации в персональном компьютере : учеб. пособие. М. : Форум, 2017. 456 с.
21. Жданов О.Н. Методика выбора ключевой информации для алгоритма блочного шифрования. М. : ИНФРА-М, 2015. 78 с.
22. Камский В. Защита личной информации в интернете, смартфоне и компьютере. СПб. : Наука и техника, 2017. 123 с.
23. Шувалов В.П. Обеспечение показателей надежности телекоммуникационных систем и сетей. М. : Горячая линия, 2015. 68 с.
24. Алгоритм Диффи – Хелмана. URL: <http://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/212946> (дата обращения: 22.05.2021).

---

*Акельев Евгений Сергеевич – канд. экон. наук, доцент, каф. экономики, Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, e-mail: akl\_evge@mail.ru.*

*Демин Антон Анатольевич – студент, каф. АОИ, Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, e-mail: deminanton735@gmail.com.*

**ORGANIZATION OF SECURE REMOTE ACCESS USING  
A VIRTUAL PRIVATE NETWORK FOR THE OPERATION  
OF IT BUSINESS IN THE MODERN CONDITIONS OF FINANCIAL  
AND ECONOMIC OPERATION'S DIGITALIZATION**

*The development of advanced information technologies provides a qualitatively new level of infrastructural opportunities for doing IT business, that's why not only new opportunities, but also modern threats of information leakage appear. The organization of secure remote access using a virtual private network (VPN) is becoming one of the modern solutions in the field of trusted interaction technologies.*

**Keywords:** *virtual private network, secure remote access, trusted interaction technologies, security, digitalization.VPN protocol*

*Akelyev Evgeny Sergeevich – Candidate of Economic science, Associate Professor, Department of Economics, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 634050, Tomsk, Lenin Ave., 40, e-mail: akl\_evge@mail.ru.*

*Demin Anton Anatolyevich – student, Department of Data Processing Automation, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 634050, Tomsk, Lenin Ave., 40, e-mail: deminanton735@gmail.com.*

И.Б. Мищенко, В.В. Косьянчук, Е.Ю. Зыбин,  
М.А. Леликов, Г.А. Платошин

## ПОСТРОЕНИЕ КИБЕРЗАЩИЩЕННОЙ БОРТОВОЙ ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ ВОЗДУШНОГО СУДНА

*Рассматриваются способы защиты бортовой информационно-вычислительной сети от несанкционированного доступа. Приводятся основные алгоритмы криптографического и некриптографического методов защиты информации, излагается описание бортового киберзащищенного шлюза.*

**Ключевые слова:** бортовая информационно-вычислительная сеть, кибербезопасность, киберзащищенный шлюз, ARINC 664

Авиакомпании и авиапроизводители на борту воздушного судна (ВС) предоставляют дополнительные услуги, удовлетворяющие потребности клиентов, в частности подключение к мультимедийной системе развлечений посредством широкополосного интернета. Такая возможность появилась ввиду стремительного технологического развития микроэлектронной промышленности, что способствовало увеличению резервов пропускной способности, объема памяти, скорости работы и производительности процессоров и, как следствие, расширению и внедрению перспективных авиационных систем. Применение новых технологий и усложнение бортовой сети оказывают влияние на надежность и безопасность комплекса бортового оборудования, кроме того, увеличивается вероятность возникновения прецедентов несанкционированного доступа. Из вышеизложенного следует, что разработка киберзащищенной бортовой сети является важной задачей в целях предотвращения уязвимостей информационной безопасности. Рассмотрим несанкционированный доступ к бортовому оборудованию, который может быть осуществлён только через систему радиосвязи, информационно-развлекательную систему и систему связи бортпроводников (в том числе при техническом обслуживании). Чтобы исключить несанкционированный доступ от любых внешних систем, разработано новое устройство – бортовой киберзащищенный шлюз.

**Сегменты бортовой авиационной сети.** Одним из основных требований к безопасности авиационных сетей передачи данных является разделение различных подсистем сети. Авиационная сеть передачи данных может содержать три основных сегмента, а именно сеть управле-

ния, сеть экипажа и сеть для пассажиров. Сеть управления преимущественно состоит из компонентов авионики, включает в себя системы управления полетом, навигационные и радиосистемы. К авионике относятся все критически важные системы для надежного управления ВС. Сеть экипажа используется летным экипажем для мониторинга и контроля ВС, а также предоставляет информацию обслуживающему и техническому персоналу. Пассажирская сеть обеспечивает интернет, предоставляет развлекательные услуги и информацию о полете, опираясь на потребности пассажира. Для разделения информационно-вычислительной платформы по уровням доверия между ними внедряется дополнительное аппаратное средство защиты: бортовой защищенный шлюз.

Спецификация ARINC 664, часть 5 является основным стандартом, регламентирующим обеспечение высокоскоростной передачей данных на борту ВС. Она содержит описание алгоритмов, необходимых для гарантированной информационной безопасности бортовой информационно-вычислительной сети. Рассматриваются криптографические и некриптографические механизмы защиты информации.

**Методы защиты информации.** Криптографические механизмы безопасности могут обеспечивать аутентификацию, целостность, конфиденциальность данных и отказоустойчивость. Безопасность реализуется с помощью алгоритмов шифрования на любом из уровней модели OSI. Алгоритм шифрования – это набор логических правил, определяющих процесс преобразования информации из открытого состояния в зашифрованное и, наоборот, из зашифрованного состояния в открытое [1]. Ключ шифрования – случайная, псевдослучайная или специальным образом сформированная последовательность битов, являющаяся переменным параметром алгоритма шифрования. Если зашифровать одну и ту же информацию одним и тем же алгоритмом, но разными ключами, результаты получатся также разные. Ключ шифрования имеет одну существенную характеристику – длину, которая, как правило, измеряется в битах.

Криптографические методы бывают:

- 1) бесключевые – не используют в вычислениях ключи;
- 2) одноключевые – в них используется дополнительный ключевой параметр (секретный ключ);
- 3) двухключевые – использующие два ключа: секретный и открытый.

Существуют различные методы криптографического контрольного суммирования: бесключевое хэширование; вычисление имитоприставки; использование кодов аутентификации сообщений.

Фактически, все эти методы различным образом из данных произвольного размера с использованием секретного ключа или без него

вычисляют некую контрольную сумму фиксированного размера, однозначно соответствующую исходным данным. Такое криптографическое контрольное суммирование широко используется в различных методах защиты информации.

Некриптографические механизмы защиты часто называют брандмауэрами. В сетях брандмауэр используется для блокирования или фильтрации трафика, направляемого из одной сети в другую [1].

Все брандмауэры можно разделить на три типа.

1. Пакетные фильтры (packet filter). Брандмауэры с пакетными фильтрами принимают решение о том, пропустить пакет или отбросить.

2. Серверы прикладного уровня (application gateways). Брандмауэры с серверами прикладного уровня используют проху-серверы, запускаемые на брандмауэре и пропускающие через себя весь трафик, относящийся к данному сервису.

3. Серверы уровня соединения (circuit gateways). Сервер уровня соединения представляет собой транслятор TCP-соединения. Пользователь образует соединение с определенным портом на брандмауэре, после чего последний производит соединение с местом назначения по другую сторону от брандмауэра.

Спецификация ARINC 664, часть 5 предлагает использовать следующие категории брандмауэров [2]:

- проху-серверы для повышения производительности и безопасности;

- размещение пакетных фильтров в стратегических местах для дальнейшей защиты сети авиационных данных от внешних/внутренних атак;

- выделенный сервер мониторинга/контроля сетевой активности для повышения уровня безопасности.

Таким образом, для обеспечения кибербезопасности необходимо использовать специальный киберзащищенный шлюз, который на основе криптографических и некриптографических методов обеспечивает защиту бортовой сети. В результате анализа наиболее оптимальным алгоритмом признан «Кузнечик» [3]. Этот алгоритм возможно реализовать согласно законодательству РФ, в отличие от многих других. Симметричный алгоритм шифрования «Кузнечик» имеет размер блока 128 бит и длину ключа 256 бит, использует для генерации раундовых ключей подстановочно-перестановочные сети.

**Бортовой киберзащищенный шлюз.** Киберзащищенный шлюз реализован на базе ПЛИС Xilinx Kintex 7. Проект для ПЛИС состоит из следующих блоков: MicroBlaze; MicroBlaze Debug Module; Clocking Wizard; Processor System Reset; AXI Interconnect; AXI GPIO; AXI Direct Memory Access; AXI 1G/2.5G Ethernet Subsystem; AXI Smart Connect; AXI BRAM Controller; Block Memory Generator. Ядро MicroBlaze

используется для организации управления всеми IP-ядрами проекта. MicroBlaze Debug Module необходим для осуществления отладки. Clocking Wizard создает два тактовых сигнала: первый имеет частоту 200 МГц, второй – 100 МГц. IP-ядро Processor System Reset служит для организации управляемого сброса схемы. AXI Interconnect обеспечивает взаимосвязь между блоками и процессором MicroBlaze. Ядро AXI GPIO необходимо для управления светодиодами. Для передачи и приема информации используется блок AXI 1G/2.5G Ethernet Subsystem, в котором выбирается интерфейс приема/передачи, однако для корректной работы данного блока необходим прямой доступ к памяти, что осуществляется с помощью IP-ядер DMA, AXI SmartConnect, AXI BRAM Controller, Block Memory Generator.

**Заключение.** Рассмотрены принципы построения киберзащищенной бортовой информационно-вычислительной сети, способствующие предотвращению случайных и умышленных деструктивных воздействий на воздушное судно. В результате проведенного анализа выделены основные составляющие и уязвимые места авиационной сети. С целью безопасной передачи данных разработаны методы и устройство защиты информации. Размещение на борту специального киберзащищенного шлюза в местах стыковки систем позволит осуществлять контроль сетевого трафика на предмет достоверных источников информации. Одновременно с этим повысить степень защиты информационных данных предлагается за счет применения блочного шифрования, а именно алгоритма «Кузнечик». Внедрение предлагаемых методов защиты бортовой информационно-вычислительной сети может обеспечить гарантированный уровень надежности авиационных систем и безопасную эксплуатацию воздушного судна.

*Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ по договору № 075-15-2022-1024.*

### Список использованной литературы

1. Голиков А.М. Основы информационной безопасности. Томск : Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники», 2007. 288 с.
2. Aircraft data network network domain characteristics and interconnection ARINC specification. ARINC 664 p5. Aeronautical radio, Inc. 2005. 125 p.
3. Курганов Е.А. О глубине аппаратной реализации блочного шифра Кузнечик // Интеллектуальные системы. Теория и приложения. 2016. Т. 20, вып. 1. С. 61–78.

---

*Мищенко Ирина Борисовна – инженер 2-й категории, Федеральное автономное учреждение «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем», 125319, г. Москва, ул. Викторенко, д. 7, к. 2, e-mail: mishchenko\_ib@gosniias.ru.*

*Косьянчук Владислав Викторович – заместитель генерального директора, д-р техн. наук, проф. РАН, Федеральное автономное учреждение «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем», 125319, г. Москва, ул. Викторенко, д. 7, к. 2, e-mail: vvk@gosniias.ru.*

*Зыбин Евгений Юрьевич – начальник подразделения, д-р техн. наук, Федеральное автономное учреждение «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем», 125319, г. Москва, ул. Викторенко, д. 7, к. 2, e-mail: zybin@gosniias.ru.*

*Леликов Максим Алексеевич – заместитель начальника подразделения, канд. техн. наук, Федеральное автономное учреждение «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем», 125319, г. Москва, ул. Викторенко, д. 7, к. 2, e-mail: lelikov\_ma@gosniias.ru.*

*Платошин Георгий Александрович – начальник лаборатории, Федеральное автономное учреждение «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем», 125319, г. Москва, ул. Викторенко, д. 7, к. 2, e-mail: pga@gosniias.ru.*

## **CONSTRUCTION OF A CYBER-PROTECTED ON-BOARD INFORMATION AND COMPUTING NETWORK OF AN AIRCRAFT**

*The article discusses ways to protect the on-board information and computing network from unauthorized access. The basic algorithms of cryptographic and non-cryptographic methods of information protection are considered. The description of the onboard cyber-protected gateway is defined.*

**Keywords:** *on-board information and computing network, cybersecurity, cyber secure gateway, ARINC 664*

*Mishchenko Irina Borisovna – engineer of the 2nd category, Federal Autonomous Institution «State Research Institute of Aviation Systems», 125319, Moscow, Viktorenko str., 7, k. 2, mail: mishchenko\_ib@gosniias.ru.*

*Vladislav Viktorovich Kosyanchuk – Deputy General Director, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Russian Academy of Sciences, Federal Autonomous Institution «State Research Institute of Aviation Systems», 125319, Moscow, Viktorenko str., 7, k. 2, mail: vvk@gosniias.ru.*

*Zybin Evgeny Yuryevich – Head of the department, Doctor of Technical Sciences, Federal Autonomous Institution «State Research Institute of Aviation Systems», 125319, Moscow, Viktorenko str., 7, k. 2, mail: zybin@gosniias.ru.*

*Lelikov Maksim Alekseevich – Deputy Head of the Department, Federal Autonomous Institution «State Research Institute of Aviation Systems», 125319, Moscow, Viktorenko str., 7, k. 2, mail: lelikov\_ma@gosniias.ru.*

*Platoshin Georgy Alexandrovich – Head of the laboratory, Federal Autonomous Institution «State Research Institute of Aviation Systems», 125319, Moscow, Viktorenko str., 7, k. 2, mail: pga@gosniias.ru.*

**УДК 621.396.67**

**С.В. Мелихов**

### **О ПРИНЦИПЕ ВЗАИМНОСТИ ДЛЯ АНТЕННЫ «ЗАЗЕМЛЕННЫЙ ВИБРАТОР»**

*Рассмотрены основные параметры симметричного и несимметричного вибраторов, используемых в качестве приемопередающих антенн в трансиверах радиосвязи. На основе теоретических параметров показано, что для настроенного и согласованного несимметричного вертикального вибратора коэффициент усиления для режима передачи отличается от коэффициента усиления для режима приема. При этом обосновано, что принцип взаимности не нарушается.*

***Ключевые слова:** радиосвязь, симметричный вибратор, заземленный вибратор, коэффициент направленного действия, коэффициент усиления, действующая высота, мощность, приемник, принцип взаимности*

В трансиверах (приемопередатчиках) радиосвязи в качестве передающих и приемных антенн широко используются согласованные вертикальные симметричный вибратор (СВ) и заземленный вибратор (ЗВ), то есть несимметричный вибратор, находящийся над проводящей поверхностью.

Приведем известные характеристики таких антенн [1, 2].

Полное активное сопротивление антенны

$$R_A = R_\Sigma + R_{\text{пот}}, \quad (1)$$

где  $R_\Sigma$  – сопротивление излучения;  $R_{\text{пот}}$  – сопротивление потерь.

Зависимость сопротивления излучения  $R_{\Sigma}$  идеального (находящегося в неограниченном свободном пространстве и выполненного из очень тонких проводников) СВ от отношения его электрической длины  $l$  к длине волны  $\lambda$  приведена на рисунке 1.

Коэффициент полезного действия (КПД) антенны

$$\chi = \frac{P_{\Sigma}}{P_A} = \frac{I^2 R_{\Sigma}}{I^2 R_A} = \frac{R_{\Sigma}}{R_{\Sigma} + R_{\text{пот}}}, \quad (2)$$

где  $P_{\Sigma}$  – мощность излучения;  $P_A$  – мощность, подводимая от передатчика к антенне;  $I$  – ток, питающий антенну.

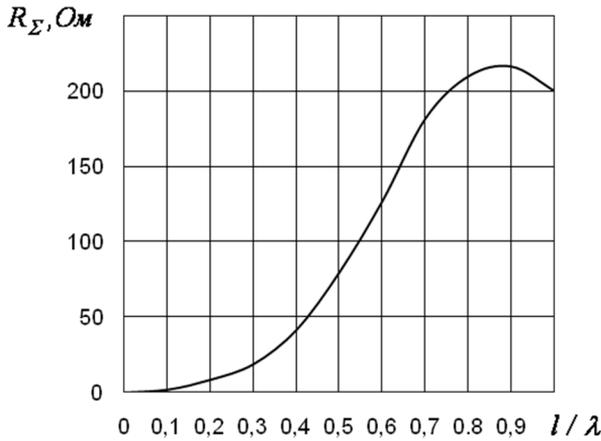


Рисунок 1 – Зависимость сопротивления излучения симметричного вибратора от его длины, отнесенной к длине волны

Для упрощения расчетов обычно считают, что у настроенных антенн  $R_{\Sigma} \gg R_{\text{пот}}$ , а их КПД  $\chi \approx 1$ .

Коэффициент направленного действия (КНД) антенны  $D$  показывает, во сколько раз плотность потока мощности  $\Pi_m$ , излучаемой данной антенной в определенном направлении, превосходит плотность потока мощности  $\Pi_i$ , излучаемой изотропной (ненаправленной – isotropic) антенной, при условии, что мощности излучения обеих антенн равны, а измерения плотности потоков мощности проводятся на одинаковом удалении от антенн:

$$D = \frac{\Pi_m}{\Pi_i}; \quad D [\text{дБи}] = D [\text{дБ}] = 10 \lg \left( \frac{\Pi_m}{\Pi_i} \right). \quad (3)$$

Коэффициент усиления (коэффициент передачи) антенны – это произведение КНД и КПД:

$$G = D \chi; \quad G [\text{дБ}i] = 10 \lg(D \chi). \quad (4)$$

В таблице 1 приведены значения коэффициентов усиления настроенных СВ и ЗВ (в этом случае  $\chi = 1$  и  $G = D$ ), работающих в качестве передающих.

Как следует из таблицы 1, в режиме передачи коэффициент усиления идеального ЗВ в 2 раза больше, чем идеального СВ:

$$\frac{G_{\text{п зв}}}{G_{\text{п св}}} = \frac{3,28}{1,64} = 2. \quad (5)$$

Это объясняется тем, что ЗВ излучает в одну верхнюю полусферу относительно земли.

Таблица 1 – Коэффициенты усиления настроенных вибраторов в режиме передачи

Параметр	Полуволновой симметричный вибратор	Четвертьволновой заземленный вибратор
$G = D$ (при $\chi = 1$ )	1,64	3,28

Полное сопротивление СВ (при  $R_{\Sigma} \gg R_{\text{пот}}$ )

$$\begin{aligned} Z_{\text{А св}} &= R_{\text{А св}} + jX_{\text{А св}} = \\ &= \frac{R_{\Sigma}}{(R_{\Sigma} / \rho)^2 + \sin^2(kl/2)} - j \frac{(\rho/2) \sin(kl)}{(R_{\Sigma} / \rho)^2 + \sin^2(kl/2)}, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $k = 2\pi / \lambda$  – волновое число;  $l$  – электрическая длина симметричного вибратора;  $\rho \approx 120 \ln \frac{\lambda}{\pi r_{\text{пр}}} - 70 = 276 \lg \frac{\lambda}{\pi r_{\text{пр}}} - 70$  – волновое сопротивление СВ, Ом (формула Кессениха);  $r_{\text{пр}}$  – средний радиус провода вибратора.

Если  $l \leq \lambda / 2$ , то для расчета сопротивления излучения СВ пользуются формулой

$$R_{\Sigma \text{ св}} = 80 \pi^2 \left( \frac{h_{\text{д св}}}{\lambda} \right)^2 \approx 800 \left( \frac{h_{\text{д св}}}{\lambda} \right)^2, \quad (7)$$

где  $h_{\text{д св}}$  – действующая высота (длина) СВ, равная отношению ЭДС сигнала  $E_c$ , наводимой в СВ, к напряженности электромагнитного поля сигнала в точке приема  $\varepsilon_c$ :

$$h_{\text{д св}} = \frac{E_c}{\varepsilon_c}. \quad (8)$$

Для СВ при  $l \leq \lambda / 2$

$$h_{\text{д св}} = \frac{\lambda}{\pi} \operatorname{tg} \left[ \frac{\pi}{2} \cdot \frac{l}{\lambda} \right]. \quad (9)$$

Симметричный вибратор настроен на частоту принимаемого сигнала, если его электрическая длина  $l = \lambda / 2$  (полуволновой СВ). В этом случае

$$h_{\text{д св}} = \frac{\lambda}{\pi} = \frac{2l}{\pi}. \quad (10)$$

За счет эффекта укорочения, зависящего от волнового сопротивления, геометрическая длина настроенного СВ  $l_{\text{Г}}$  меньше его электрической длины:

$$l_{\text{Г св}} = l \left( 1 - \frac{42,5}{\pi \rho} \right) = \frac{\lambda}{2} \left( 1 - \frac{42,5}{\pi \rho} \right). \quad (11)$$

Полное входное сопротивление ЗВ в 2 раза меньше, чем СВ соответствующей длины ( $l_{\text{ЗВ}} = l / 2$ ):

$$Z_{\text{А ЗВ}} = Z_{\text{А СВ}} / 2. \quad (12)$$

Формула для приближенного расчета сопротивления излучения ЗВ при его длине  $l_{\text{ЗВ}} \leq \lambda / 4$  имеет вид

$$R_{\Sigma \text{ ЗВ}} \approx 1600 \left( \frac{h_{\text{д ЗВ}}}{\lambda} \right)^2, \quad (13)$$

где действующая длина (высота) заземленного вибратора

$$h_{\text{д ЗВ}} = \frac{\lambda}{2\pi} \operatorname{tg} \left[ \pi \cdot \frac{l_{\text{ЗВ}}}{\lambda} \right]. \quad (14)$$

Заземленный вибратор настроен на частоту принимаемого сигнала, если его электрическая длина  $l_{\text{ЗВ}} = \lambda / 4$  (четвертьволновой ЗВ или четвертьволновой штырь). В этом случае

$$h_{дзв} = \frac{\lambda}{2\pi} = \frac{2l_{зв}}{\pi}. \quad (15)$$

Из-за эффекта укорочения геометрическая длина настроенного ЗВ меньше его электрической длины:

$$l_{гзв} = l_{зв} \left( 1 - \frac{21,25}{\pi\rho} \right) = \frac{\lambda}{4} \left( 1 - \frac{21,25}{\pi\rho} \right). \quad (16)$$

Рассмотрим особенности СВ и ЗВ при использовании в режиме приема радиосигнала.

Мощность радиосигнала на входе приемника (часто используют термин «мощность радиосигнала в антенне приемника» [3]) при настроенной и согласованной со входом приемника антенне рассчитывают следующим образом [4]:

$$P_{с\text{ вх}} = \frac{P_{эк} G_{пр}}{L_p}, \quad (17)$$

где  $P_{эк}$  – эквивалентная изотропно излучаемая мощность передатчика, Вт;  $G_{пр}$  – коэффициент усиления по мощности приемной антенны;  $L_p$  – ослабление мощности радиоволны, зависящее от характера трассы распространения, дальности и радиочастоты.

При настроенной и согласованной со входом приемника антенне ( $R_A = R_{вх\text{ пр}}$ , где  $R_{вх\text{ пр}}$  – входное сопротивление приемника) мощность сигнала на входе приемника  $P_{с\text{ вх}}$ , ЭДС сигнала в антенне  $E_c$  и напряженность поля сигнала в точке приема  $\epsilon_c$  связаны между собой следующим образом:

$$P_{с\text{ вх}} = \left( \frac{E_c}{2} \right)^2 \frac{1}{R_{вх\text{ пр}}} = \frac{E_c^2}{4 R_{вх\text{ пр}}} = \frac{E_c^2}{4 R_A}; \quad E_c = \epsilon_c h_d. \quad (18)$$

Оценим эффективность использования настроенных и согласованных со входом приемника СВ и ЗВ с использованием параметра «действующая высота» антенны. При этом будем считать, что в силу принципа взаимности (который гласит о том, что параметры антенн в режиме приёма сохраняются теми же, что и в режиме передачи) коэффициент усиления СВ одинаков как для режима передачи, так и для режима приема:

$$G_{п\text{ св}} = G_{пр\text{ св}} = 1,64. \quad (19)$$

Действующая высота согласованного СВ в 2 раза больше, чем согласованного ЗВ (см. формулы (10) и (15)), что характеризует большую эффективность СВ в режиме приема по сравнению с ЗВ.

При этом из выражения (18) с учетом формул (10) и (15) следует, что мощность сигнала на входе приемника с согласованным СВ

$$P_{c \text{ вх св}} = \frac{\varepsilon_c^2 (\lambda / \pi)^2}{4 R_{A \text{ св}}}, \quad (20)$$

а мощность сигнала на входе приемника с согласованным ЗВ

$$P_{c \text{ вх зв}} = \frac{\varepsilon_c^2 (\lambda / 2\pi)^2}{4 R_{A \text{ зв}}}. \quad (21)$$

Поскольку  $R_{A \text{ зв}} = R_{A \text{ св}} / 2$  (см формулы (8) и (14)), то

$$\frac{P_{c \text{ вх зв}}}{P_{c \text{ вх св}}} = \frac{1}{2}. \quad (22)$$

Формула (22) показывает, что мощность сигнала на входе приемника с ЗВ в два раза меньше, чем мощность сигнала на входе приемника с СВ.

Следовательно, в режиме приема коэффициент усиления (точнее, коэффициент передачи) ЗВ в 2 раза меньше, чем коэффициент усиления СВ:

$$G_{\text{пр зв}} = \frac{G_{\text{пр св}}}{2} = \frac{1,64}{2} = 0,82. \quad (23)$$

Данный вывод также подтверждает известная из теории вибраторных антенн формула [1, 2]

$$D = \frac{120 \pi^2 (h_d / \lambda)^2}{R_{\Sigma}}. \quad (24)$$

Из равенства (24) с учетом формул (10) и (15) для идеальных ЗВ и СВ следует

$$\frac{D_{\text{пр зв}}}{D_{\text{пр св}}} = \frac{G_{\text{пр зв}}}{G_{\text{пр св}}} = \frac{1}{4} \cdot \frac{R_{\Sigma \text{ св}}}{R_{\Sigma \text{ зв}}}. \quad (25)$$

С учетом того, что  $R_{\Sigma \text{ зв}} = R_{\Sigma \text{ св}} / 2$ , получаем

$$D_{\text{пр зв}} = G_{\text{пр зв}} = \frac{D_{\text{пр св}}}{2} = \frac{G_{\text{пр св}}}{2} = \frac{1,64}{2} = 0,82. \quad (26)$$

Проведенные рассуждения показывают, что для идеального согласованного ЗВ коэффициенты усиления различаются в режимах передачи и приема в 4 раза (см. таблицу 1 и формулу (26)):

$$\frac{G_{\text{п зв}}}{G_{\text{пр зв}}} = \frac{3,28}{0,82} = 4. \quad (27)$$

Это, на первый взгляд, противоречит принципу взаимности. Однако необходимо принять во внимание, что для идеального согласованного ЗВ (находящегося над проводящей поверхностью) создаются разные условия при передаче и приеме в отличие от равных условий при передаче и приеме для идеального согласованного СВ (находящегося в неограниченном свободном пространстве и имеющего  $G_{\text{пр св}} = G_{\text{п св}}$ ).

В самом деле, ЗВ излучает только в верхнюю полусферу относительно земли в отличие от СВ, излучающего в две полусферы. При этом  $G_{\text{п зв}} = 2G_{\text{п св}}$ . При приеме ЗВ преобразует напряженность поля в мощность сигнала с эффективностью в два раза меньшей, чем СВ, поскольку «в действии» находится только один провод ЗВ, расположенный над проводящей поверхностью (при этом  $h_{\text{д зв}} = h_{\text{д св}} / 2$ ). Кроме того, при согласовании сопротивление нагрузки ЗВ в два раза меньше, чем для СВ. Поэтому коэффициент усиления ЗВ в режиме приема  $G_{\text{пр зв}} = G_{\text{св}} / 2 = D_{\text{св}} / 2$ , что и показывают формулы (23) и (26).

### Список использованной литературы

1. Белоцерковский Г.Б. Антенны. М. : Советское радио, 1969. 328 с.
2. Беньковский З., Липинский Э. Любительские антенны коротких и ультракоротких волн : пер. с пол. / под ред. О.П. Фролова. М. : Радио и связь, 1983. 480 с.
3. Бобров Н.В. Расчет радиоприемников. М. : Связь, 1979. 368 с.
4. Маковеева М.М., Шинаков Ю.С. Системы связи с подвижными объектами : учеб. пособие для вузов. М. : Радио и связь, 2002. 440 с.

---

*Мелихов Сергей Всеволодович – д-р техн. наук, проф., каф. радиотехнических систем, Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, email: mrc@main.tusur.ru.*

Е.В. Рогожников, Д.А. Кондрашов,  
А.В. Коновальчиков, К.В. Диноченко

## ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ КОРРЕКТНОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ 5G NR В СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМАХ СВЯЗИ

*Перспективным направлением в области телекоммуникаций является организация беспроводной широкополосной сети с применением космических аппаратов. Это открывает возможность покрыть связью большую часть поверхности земли, акватории, приполярных и полярных областей. Реализация систем связи с применением спутников значительно сокращает расходы и упрощает развертывание сети на труднодоступных территориях и в местах без достаточной системы коммуникаций. Исследуется возможность применения технологии радиодоступа пятого поколения (5 Generation New Radio – 5G NR) в системах спутниковой связи (ССС) Ku- и Ka-диапазона частот с точки зрения кадровой и частотной синхронизации. Приводится описание математической модели канала распространения в СССР, выполненной в QuaDRiGa (Quasi Deterministic Radio Channel Generator), модели передатчика для формирования сигнала и приемника для его обработки и оценки вероятности корректной синхронизации в случаях большого доплеровского ухода частоты и в условиях низкого отношения сигнал/шум. Представлены результаты математического моделирования.*

**Ключевые слова:** 5G NR, спутниковая связь, спутниковый канал распространения, частотная синхронизация, временная синхронизация

Концепция неназемных сетей (non-terrestrial network – NTN) подразумевает адаптацию 5G NR для применения в СССР и иных системах посредством летательных аппаратов (беспилотников, аэростатов, т.п.) [1]. Применение стандарта 5G NR в системах со спутниковым каналом распространения накладывает новые условия к формированию и обработке сигнала на физическом уровне. В таком канале распространения сигнал подвергается большим задержкам и большому ослаблению, что приводит к низкому отношению сигнал/шум (ОСШ) относительно наземного канала за счет значительно больших расстояний. При максимально допустимом размере соты в 5G NR 300 км в СССР КА располагаются на высоте от 500 км в случае низкой околоземной орбиты (Low Earth Orbit – LEO) до 36 000 км в случае геостационарной орбиты (Geostationary Earth Orbit – GEO).

Кроме того, проблемой спутникового канала распространения является большое доплеровское смещение несущей частоты из-за скорости движения КА относительно абонентского устройства (User Equipment – UE). В 5G NR предусмотрена корректировка доплеровского смещения частоты до 60 кГц. Спутники на LEO движутся со скоростью порядка 7200 км/с, что приводит к смещению несущей частоты более чем на 720 кГц на несущей 30 ГГц [1].

Из-за того что в спутниковом канале передачи условия значительно хуже, чем в наземном, снижается качество сигнала, частотной и временной синхронизации для верного декодирования информации. Высокое доплеровское смещение несущей частоты значительно снижает вероятность корректной частотной синхронизации. При больших задержках увеличивается защитный интервал между восходящим и нисходящим каналами, а низкий ОСШ снижает вероятность корректного декодирования сигналов и каналов 5G NR.

Для начальной синхронизации нисходящей линии связи, а также получения информации о параметрах сети необходимо обнаружить синхроблок (Synchronization Signal Block – SSB), в котором содержатся сигналы первичной синхронизации (Primary Synchronization Signal – PSS), вторичной синхронизации (Secondary Synchronization Signal – SSS) и системная информация в физическом широковещательном канале (Physical Broadcast Channel – PBCH).

Структурная схема модели передачи и обработки SSB представлена на рисунке 1. Задача модели – оценка вероятности корректного декодирования физического идентификатора соты Cell ID, который передается в PSS и SSS, а также оценка соотношения ошибочно принятых блоков данных и переданных (Block Error Rate – BLER) в канале PBCH.

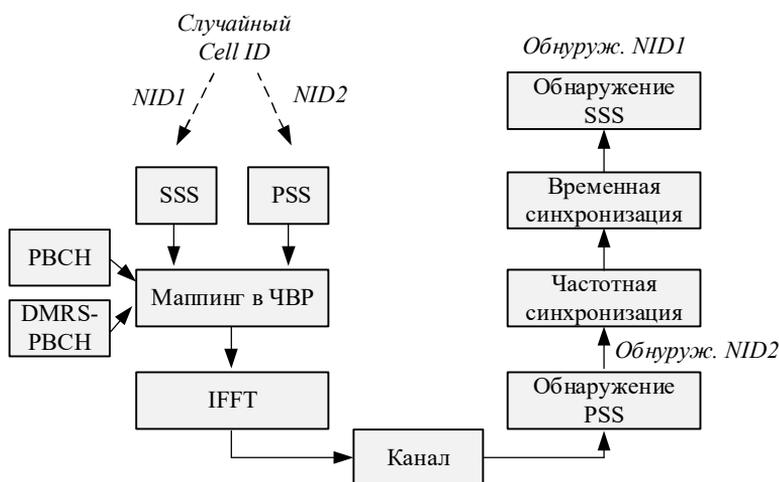


Рисунок 1 – Структурная схема модели передачи и обработки SSB

Для формирования и обработки сигналов использованы скрипты из библиотеки MatLab, внутренние параметры которых были предварительно настроены для используемой конфигурации системы. В модели предусмотрена временная и частотная синхронизация по сигналам PSS и SSS вместе с оценкой ошибки синхронизации.

Входные и выходные параметры модели передачи и обработки SBB приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 – Входные параметры модели передачи и обработки SBB

Входные параметры	Описание
Fc	Несущая частота, Гц
H	Высота орбиты, км
G	Коэффициент усиления приемной антенны, дБ
Tsat	Индекс точки на траектории спутника
ItN	Количество итераций моделирования
SSC	Расстояние между поднесущими, Гц
Tn	Шумовая температура, К

Таблица 2 – Выходные параметры модели передачи и обработки SBB

Выходные параметры	Описание
FreqOffset	Оценка ухода частоты, Гц
FreqEstimateError	Погрешность оценки ухода частоты, Гц
CellIDDecodeProb	Вероятность истинного обнаружения PSS и SSS
SNR	Отношение сигнал/шум, дБ

Для расчета канальных характеристик использовался универсальный генератор канальных матриц QuaDRiGa, поддерживающий реализацию сценариев КА – Земля.

QuaDRiGa разработана для моделирования радиоканалов при различных конфигурациях и условиях распространения радиосигнала [2]. Данная модель основывается на широко известных моделях беспроводных каналов, таких как SCM и WINNER, кроме того, в ней используются новые подходы к моделированию посредством дополнительных функций, которые позволяют прописывать динамические сценарии. В нашей модели QuaDRiGa использовалась для получения реалистичных канальных матриц и значений ослабления сигнала в сценарии передачи данных со спутника на терминал, расположенный на поверхности Земли.

Входные параметры модели представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Входные параметры модели расчета ослабления сигнала и канальных матриц

Входные параметры	Описание
az	Азимут спутника относительно наземной станции, град
el	Угол места спутника относительно наземной станции, град
orbit	Высота орбиты спутника над уровнем земли, км
fe	Частота сигнала, Гц

Каждый расчет ослабления и канальной матрицы для определенного положения спутника на орбите относительно наземного терминала задавался статичным сценарием, при котором положение спутника определялось высотой орбиты, азимутом и углом места относительно наземного терминала, расположенного на определенной широте. Для спутника была задана параболическая антенна радиусом 3 м с левосторонней круговой поляризацией (Left-Handed Circular Polarization – LHCP). Для приемного наземного терминала была задана патч-антенна с вертикальной поляризацией и углом раскрытия  $90^\circ$  по азимуту и углу места. Полное описание сценариев для спутников приведено в 3GPP TR 38.811.

Выходные параметры модели представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Выходные параметры модели расчета ослабления сигнала и канальных матриц

Выходные параметры	Описание
attenuation	Ослабление сигнала, дБ
h_channel	Отсчеты ИХ спутникового канала передачи
beam_delay	Задержки лучей, с

Для оценки доплеровского смещения частоты и задержки сигнала создана модель с помощью инструментов MathLab. За основу взят пример с официального сайта MathWorks [1]. Моделирование осуществлялось согласно сценарию, по которому спутник движется в течение суток с 13:10:00 21.03.2022 по 13:10:00 22.03.2022.

Программа принимает на вход кеплеровы элементы орбиты и частоту сигнала. Описание входных параметров дано в таблице 5. Программа возвращает семь параметров (таблица 6).

Всего выполняется 1440 измерений, при этом часть данных отсутствует, так как спутник большую часть времени находится вне зоны досягаемости наземной станции.

Таблица 5 – Обозначение входных параметров в программе

Входные параметры	Описание
Orbital	Высота орбиты спутника над уровнем земли, км
e	Форма орбиты: окружность / эллипс / парабола / гипербола
i	Угол наклона плоскости орбиты относительно плоскости экватора, град
omega	Долгота восходящего узла, град
w	Аргумент перицентра, град
v	Истинная аномалия, град
fe	Частота сигнала, Гц

Таблица 6 – Обозначение выходных параметров в программе

Выходные параметры	Описание
az	Азимут спутника относительно наземной станции, град
el	Угол места спутника относительно наземной станции, град
fo	Смещение частоты вследствие эффекта Доплера, Гц
fo_Time	Временные отметки для измеренного смещения частоты, с
latency	Задержка сигнала, с
latencyTime	Временные отметки для измеренной задержки сигнала, с
sc	Объект созданного сценария, который позволяет пронаблюдать траекторию движения спутника с помощью команды play (sc)

После создания сценария и добавления к нему спутника и наземной станции:

1) определяется наличие спутника в видимости наземной станции, все последующие вычисления выполняются только при выполнении данного условия;

2) вычисляется азимут, угол места и расстояние спутника относительно наземной станции;

3) используя значение расстояния от наземной станции до спутника, вычисляется задержка;

4) вычисляется ускорение спутника относительно местной системы координат: север, восток, вниз (North, East, Down – NED);

5) с помощью значения азимута и угла места вычисляется направление расположения наземной станции по отношению к спутнику;

6) с помощью направления и ускорения спутника относительно NED вычисляется его ускорение вдоль линии связи между спутником и наземной станцией;

7) с помощью ускорения относительно наземной станции вычисляется смещение частоты в результате эффекта Доплера.

С помощью разработанной имитационной модели произведено модельное исследование и оценка основных характеристик системы (таблица 7).

Таблица 7 – Основные параметры моделируемой системы

Параметр	Прямой канал	Обратный канал
Несущая частота $f_0$ , ГГц	12,6 / 20,1	14,45 / 29,95
Дуплекс	Частотный (FDD)	Частотный (FDD)
Полоса сигнала $B$ , МГц	50, 100, 200	50, 100
Расстояние между поднесущими $\Delta f$ , кГц	120, 240 (для SSB)	120
Высота орбиты $H$ , км	500, 1000	500, 1000
Шумовая температура $T_n$ , К	600	800
Эффективная изотропно излучаемая мощность $P_f$ , дБ·Вт/Гц	-51 (500 км) -45 (1000 км)	-48
Коэффициент усиления приемной антенны, дБи	29	26

Для прямого и обратного каналов произведен расчет ОСШ на входе решающего устройства приемника. Для расчета использована следующая формула:

$$W = A + P_{tx} + G - N, \quad (1)$$

где  $A$  – ослабление сигнала на трассе, дБ, которое рассчитывается в QuaDRiGa;  $P_{tx}$  – мощность переданного сигнала в полосе, дБ·Вт;  $G$  – коэффициент усиления приемной антенны, дБ;  $N$  – мощность теплового аддитивного шума в полосе, дБ·Вт. Мощность переданного сигнала  $P_{tx}$  в полосе рассчитывается как  $P_{tx} = BP_f$ . Мощность теплового аддитивного шума в полосе рассчитывается как  $N = k_0 BT_n$ , где  $k_0 = 1,38 \cdot 10^{-23}$  – постоянная Больцмана. Результаты расчета ОСШ в прямом канале приведены в таблице 8.

Таблица 8 – Оценка отношения сигнал/шум в прямом канале

$H$ , км	500	1000	500	1000
$f_0$ , ГГц	12,6	12,6	20,1	20,1
ОСШ, дБ	≈14,08	≈12,91	≈9,79	≈8,72

Видно, что минимальное значение ОСШ составляет приблизительно 8,72 дБ. Этого достаточно для уверенного обнаружения сигналов синхронизации.

В таблице 9 приведены результаты расчета ОСШ в обратном канале по формуле (1). Минимальное значение ОСШ составляет около 0,11 дБ. Согласно стандарту 5G NR этого достаточно для демодуляции служебных сигналов и каналов в обратной линии связи.

Таблица 9 – Оценка отношения сигнал/шум в обратном канале

$H$ , км	500	1000	500	1000
$f_0$ , ГГц	14,5	14,45	29,95	29,95
ОСШ, дБ	$\approx 10,52$	$\approx 6,59$	$\approx 4,01$	$\approx 0,11$

Для заданной модели движения спутника рассчитаны значения доплеровского сдвига частоты в каждой дискретной точке траектории (рисунки 2 и 3).

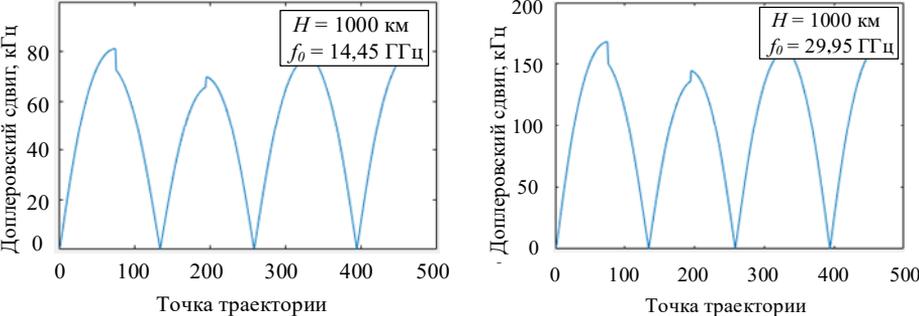


Рисунок 2 – Доплеровский сдвиг частоты в обратном канале

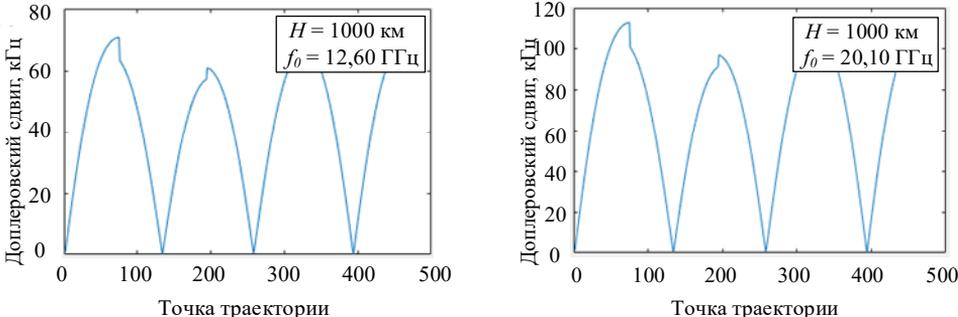


Рисунок 3 – Доплеровский сдвиг частоты в прямом канале

Максимальное значение модуля доплеровского сдвига достигает 160 кГц для несущей частоты 29,95 ГГц в обратном канале и примерно 110 кГц для несущей частоты 20,10 ГГц в прямом канале.

Сигналы PSS и SSS передаются в прямом канале. На рисунке 4 приведена зависимость вероятности корректной синхронизации по сигналам PSS и SSS от ОСШ в спутниковой линии связи при доплеровском сдвиге частоты 60,22 кГц. Численные значения результатов моделирования приведены в таблице 10. Количество итераций моделирования для расчета каждой точки  $ItN$  равно 30. Для построения зависимости, представленной на рисунке 4, эффективная изотропно излучаемая мощность (ЭИИМ) сигнала  $P_f$  изменялась от минус 46 до минус 76 дБ·Вт/Гц. Параметры модели:  $f_0 = 12,6$  ГГц,  $B = 50$  МГц,  $\Delta f = 120$  кГц,  $H = 1000$  км.

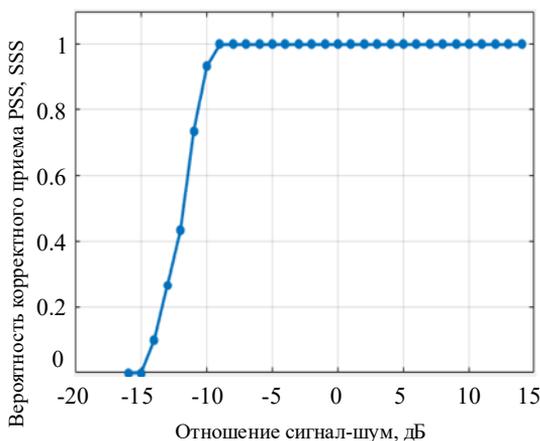


Рисунок 4 – Зависимость вероятности корректной синхронизации от отношения сигнал/шум

Таблица 10 – Численные значения вероятности корректного приема PSS и SSS

$P$	0	0	0,1	0,266	0,433	0,733	0,933	1	1
$W$ , дБ	-15,96	-14,96	-13,96	-12,96	-11,96	-10,96	-9,96	-8,96	-7,96
$P$	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$W$ , дБ	-6,96	-5,96	-4,96	-3,96	-2,96	-1,96	-0,96	0,03	1,03
$P$	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$W$ , дБ	2,03	3,03	4,03	5,03	6,03	7,03	8,03	9,03	10,03
$P$	1	1	1	1	–	–	–	–	–
$W$ , дБ	11,03	12,03	13,03	14,03	–	–	–	–	–

С помощью сигналов PSS и SSS происходит оценка частотного сдвига для дальнейшей частной синхронизации. На рисунке 5 приведена зависимость среднеквадратичного отклонения (СКО) оценки частотного сдвига от ОСШ в спутниковой линии связи. Численные значения результатов моделирования приведены в таблице 11. Количество итераций моделирования для расчета каждой точки  $ItL$  равно 30. Для построения зависимости СКО от ОСШ ЭИИМ сигнала  $P_f$  изменялась от минус 46 до минус 76 дБ·Вт/Гц. Параметры модели:  $f_0 = 12,6$  ГГц,  $B = 50$  МГц,  $\Delta f = 120$  кГц,  $H = 1000$  км. Истинное значение сдвига частоты составляет 60,22 кГц.

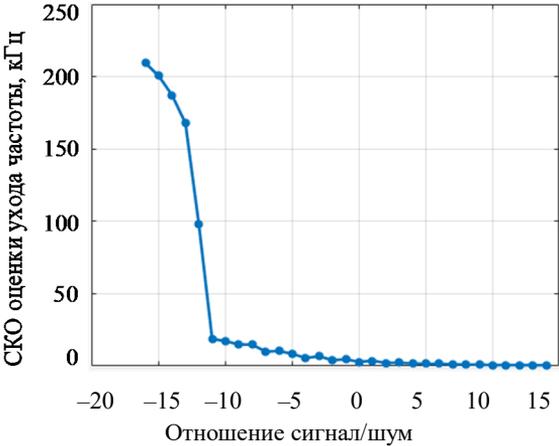


Рисунок 5 – Зависимость среднеквадратичного отклонения оценки ухода частоты от отношения сигнал/шум

Таблица 11 – Численные значения среднеквадратичного отклонения оценки ухода частоты

$\sigma$ , кГц	209,35	200,51	187,16	167,83	98,27	18,80	17,13	14,90	14,73
$W$ , дБ	-15,96	-14,96	-13,96	-12,96	-11,96	-10,96	-9,96	-8,96	-7,96
$\sigma$ , кГц	9,95	10,37	8,42	5,51	6,73	4,04	4,64	2,85	3,62
$W$ , дБ	-6,96	-5,96	-4,96	-3,96	-2,96	-1,96	-0,96	0,03	1,03
$\sigma$ , кГц	2,15	2,27	1,72	1,46	1,53	1,16	0,94	0,93	0,66
$W$ , дБ	2,03	3,03	4,03	5,03	6,03	7,03	8,03	9,03	10,03

Окончание таблицы 11

$\sigma$ , кГц	0,70	0,61	0,66	0,51	–	–	–	–	–
$W$ , дБ	11,03	12,03	13,03	14,03	–	–	–	–	–

Существенное уменьшение СКО оценки обуславливается наличием кадровой синхронизации, которая достигается при ОСШ минус 11 дБ.

Расчетное значение отношения сигнал/шум обеспечивает уверенную работу спутниковых сетей с использованием технологии радиодоступа на физическом уровне 5G NR.

При доплеровском смещении частоты 60,22 кГц вероятность корректного приема PSS и SSS достигает единицы при ОСШ минус 8,96 дБ.

### Список использованной литературы

1. 3GPP TR 38.811 V15.0.0. 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network, Study on new radio (NR) to support non terrestrial networks. 2018. Release 15.

2. Quadriga : Модель радиоканала следующего поколения / Fraunhofer Heinrich Hertz Institute. URL: <https://quadriga-channel-model.de/> (дата обращения: 23.05.2020). Яз. англ. Режим доступа: свободный.

---

*Рогожников Евгений Васильевич – зав. каф. телекоммуникации и основ радиотехники, доцент, канд. техн. наук, Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 634045, г. Томск, ул. Вершинина, 47, e-mail: evgenii.v.rogozhnikov@tusur.ru.*

*Кондрашов Данила Александрович – аспирант, каф. телекоммуникации и основ радиотехники, Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 634045, г. Томск, ул. Вершинина, 47, e-mail: danila.a.kondrashov@tusur.ru.*

*Коновальчиков Артем Владимирович – аспирант, каф. телекоммуникации и основ радиотехники, Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 634045, г. Томск, ул. Вершинина, 47, e-mail: artem.konovalchikov@tusur.ru.*

*Диноченко Кирилл Вадимович – магистрант, каф. телекоммуникации и основ радиотехники, Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 634045, г. Томск, ул. Вершинина, 47, e-mail: k.dinochenko@yandex.ru.*

## ESTIMATION OF THE PROBABILITY OF CORRECT 5G NR SYNCHRONIZATION IN SATELLITE COMMUNICATION SYSTEMS

*A promising direction in the field of telecommunications is the organization of a wireless broadband network using spacecraft (SC). This opens up the possibility of covering most of the earth's surface, water area, subpolar and polar regions with communications. The implementation of communication systems using satellites significantly reduces costs and simplifies the deployment of a network in hard-to-reach areas and places without a sufficient communication system. This article is devoted to the study of the possibility of using the fifth-generation radio access technology (5 Generation New Radio, 5G NR) in satellite communication systems (SCS) Ku and Ka frequency range in terms of frame and frequency synchronization. The article describes the mathematical model of the propagation channel in the CCC, made in QuaDRiGa (Quasi Deterministic Radio Channel Generator), the transmitter model for signal generation and the receiver for its processing and estimating the probability of correct synchronization in cases of large Doppler frequency drift and under conditions of low signal-to-signal ratio. noise. The results of mathematical modeling are presented and described.*

**Keywords:** 5G NR, satellite communication, satellite distribution channel, frequency synchronization, time synchronization

*Rogozhnikov Evgeniy Vasilievich – Head of the the Department of Telecommunications and Fundamentals of Radio Engineering, Associate Professor, Ph.D., Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 634045, Tomsk, Vershinin st., 47, e-mail: evgenii.v.rogozhnikov@tusur.ru.*

*Kondrashov Danila Aleksandrovich – post-graduate student of the Department of Telecommunications and Fundamentals of Radio Engineering, Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics, 634045, Tomsk, Vershinin st., 47, e-mail: danila.a.kondrashov@tusur.ru.*

*Konovalchikov Artem Vladimirovich – post-graduate student of the Department of Telecommunications and Fundamentals of Radio Engineering, Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics, 634045, Tomsk, Vershinin st., 47, e-mail: artem.konovalchikov@tusur.ru.*

*Dinochenko Kirill Vadimovich – undergraduate of the Department of Telecommunications and Fundamentals of Radio Engineering, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 634045, Tomsk, st. Vershinin, 47, e-mail: k.dinochenko@yandex.ru.*

Л.И. Аверина, Н.Е. Гутерман

## МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ ДЛЯ АППРОКСИМАЦИИ МАКСИМАЛЬНО ПРАВДОПОДОБНОГО АЛГОРИТМА ДЕМОДУЛЯЦИИ СИГНАЛОВ СТАНДАРТА DVB-S2

*Описывается максимально правдоподобная оценка мягких решений на выходе демодулятора сигналов стандарта DVB-S2 и рассматриваются возможные подходы к её аппроксимации. Изложен алгоритм демодуляции, основанный на машинном обучении. Эффективность алгоритма иллюстрируется графиками вероятности ошибки в принятом пакете.*

**Ключевые слова:** машинное обучение, демодуляция многопозиционных сигналов, искусственные нейронные сети, DVB-S2

Цифровое видеовещание (*Digital Video Broadcasting – DVB*) – это набор стандартов, разработанных проектом *DVB* для объединения спецификаций устройств, используемых для передачи и приема мультимедиа по кабелю, наземному или спутниковому телевидению. Для большинства спутников, передающих цифровой телевизионный сигнал, используется стандарт передачи *Digital Video Broadcasting-Satellite (DVB-S)*, который со временем претерпел некоторые изменения и был модифицирован в угоду потребительским запросам на высокую пропускную способность. Представленный в марте 2005 года стандарт второго поколения *DVB-S2* отличается более сложным помехоустойчивым кодированием и многопозиционной модуляцией. Использование кодов с малой плотностью проверок на четность требует реализации мягких решений на выходе демодулятора. В этом случае вычислительная сложность формирования максимально правдоподобной оценки символа растет пропорционально размерам сигнального созвездия, что побуждает искать подходы к аппроксимации решений [1–3].

**Максимально правдоподобная оценка и ее аппроксимация.** Максимально правдоподобный алгоритм демодуляции носит название *log-MAP* [4] и представляет собой вычисление логарифмов отношений максимальных апостериорных вероятностей принадлежности бита тому или иному символу сигнального созвездия. Логарифм отношения правдоподобия для  $i$ -го бита

$$l_i \triangleq \log \left( \frac{P_r(c_i = 0 | \hat{s})}{P_r(c_i = 1 | \hat{s})} \right), \quad (1)$$

где  $i = 1, \dots, k$ ;  $\hat{s}$  – аддитивная смесь символа с белым гауссовским шумом. Раскрывая условные плотности вероятностей нормального распределения, перепишем это выражение следующим образом:

$$l_i = \log \frac{\sum_{s \in S_0} \exp \left\{ \frac{1}{\sigma^2} \left[ -(x - s_x)^2 - (y - s_y)^2 \right] \right\}}{\sum_{s \in S_1} \exp \left\{ \frac{1}{\sigma^2} \left[ -(x - s_x)^2 - (y - s_y)^2 \right] \right\}}, \quad (2)$$

где  $s$  – точка сигнального созвездия с координатами  $s_x, s_y$  соответственно;  $x, y$  – синфазная и квадратурная составляющие принятого символа;  $S_0$  и  $S_1$  – подмножества точек сигнального созвездия, в которых рассматриваемый бит равен 0 и 1 соответственно. Таким образом, демодуляция сводится к поиску минимального евклидова расстояния между принятым символом и подмножествами  $S_0$  и  $S_1$ .

Изложенный алгоритм является статистически оптимальным, но его вычислительная сложность зависит от степени многопозиционности сигнального созвездия, что делает его непосредственную реализацию непрактичной в реальных системах.

Хорошо зарекомендовавшим себя способом аппроксимации решающего правила *log-MAP* является алгоритм *max-log-MAP* [1], основанный на приближении

$$\log \left( \sum_j \exp(-x_j^2) \right) \approx \max_j (-x_j^2). \quad (3)$$

Аппроксимация логарифма отношения правдоподобия запишется следующим образом:

$$l_i \approx \frac{1}{\sigma^2} \left( \max_{s \in S_0} \left( (x - s_x)^2 + (y - s_y)^2 \right) - \max_{s \in S_1} \left( (x - s_x)^2 + (y - s_y)^2 \right) \right). \quad (4)$$

Альтернативным способом аппроксимации является машинное обучение. Для мягкой демодуляции предложена архитектура *LLRNet*, представляющая собой полносвязную нейронную сеть с одним скрытым слоем [5]. На вход сети подаются синфазная и квадратурная составляющие, а на выходе алгоритм генерирует мягкие решения для каждого бита. Функции активации скрытого слоя – *ReLU*.

**Результаты моделирования.** Для проведения сравнительного анализа были рассмотрены три скоростных режима передачи информации в *DVB-S2*: *8PSK 2/3*, *16APSK 2/3*, *16APSK 3/4*. Объем выборки – 10000 зашумленных символов: 70 % – обучающая выборка, 15 % – валидационная и 15 % – тестовая выборка. Количество узлов в скрытом

слое – 128. Для поиска локального минимума целевой функции ошибок был использован алгоритм Левенберга – Марквардта. Результаты моделирования представлены на графиках зависимостями вероятности ошибки в пакете от отношения сигнал/шум (рисунки 1 и 2).

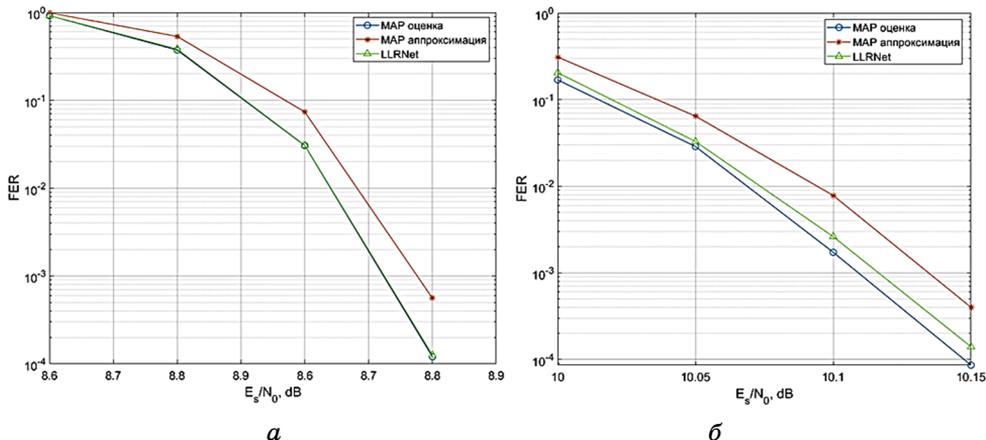


Рисунок 1 – Зависимость вероятности ошибки в пакете от отношения сигнал/шум: а – для 16APSK 2/3; б – для 16APSK 3/4

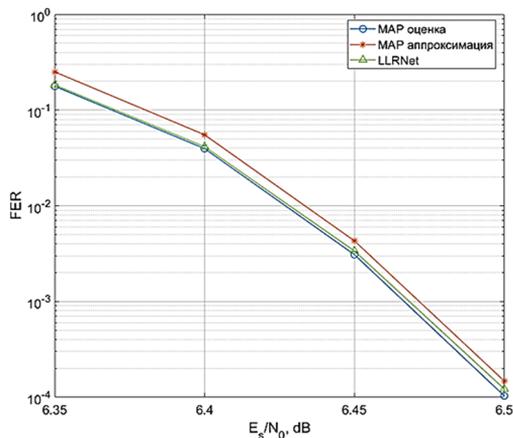


Рисунок 2 – Зависимость вероятности ошибки в пакете от отношения сигнал/шум для 8PSK 2/3

Под отношением сигнал/шум в данном случае понимается отношение энергии символа к односторонней спектральной плотности мощности шума. Для каждого значения была составлена своя обучающая выборка. Из графиков видно, что с уменьшением помехоустойчивости системы точность аппроксимации *LLRNet* уменьшается. Совпадение максимально правдоподобной оценки и оценки, полученной на основе

машинного обучения, как в случае *16APSK 2/3*, так и для *16APSK 3/4* может быть получено подбором гиперпараметров или изменением архитектуры сети.

На рисунке 2 видно, что для модуляций с малой позиционностью алгоритм *max-log-MAP* даёт достаточно точный результат. Расхождение аппроксимации *LLRNet* с максимально правдоподобным алгоритмом может быть обусловлено переобучением при заданных пропорциях и объеме обучающей выборки.

**Выводы.** Изложенный в [5] способ аппроксимации максимально правдоподобного алгоритма связан с рядом проблем. Обучение персептрона при фиксированной дисперсии белого гауссовского шума приводит к плохой обобщающей способности, а практическая реализация обучения с учителем для рассматриваемой системы затруднительна. Оценка, формируемая *LLRNet* для одних скоростных режимов и обеспечивающая достаточную точность, может быть далека от оптимальной оценки при выборе других модуляций и скоростей кодирования.

#### Список использованной литературы

1. Robertson P., Villebrun E., Hoeher P. A comparison of optimal and suboptimal MAP decoding algorithms operating in the log domain // IEEE International Conference on Communications, Seattle. USA. 1995. P. 1009–1013.

2. Tosato F., Bisaglia P. Simplified soft-output demapper for binary interleaved COFDM with application to HIPERLAN/2 // IEEE International Conference on Communications, New York. USA. 2002. P. 664–668.

3. A universal low-complexity symbol-to-bit soft demapper / Q. Wang, Q. Xie, Z. Wang [et al.] // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2014. V. 63. P. 119–130.

4. Erfanian J., Pasupathy S., Gulak G. Reduced complexity symbol detectors with parallel structure for ISI channels // IEEE Transactions on Communications. 1994. V. 42. P. 1661–1671.

5. Shental O., Hoydis J. «Machine LLRning»: Learning to softly demodulate // IEEE Globecom Workshops. 2019. URL: <https://arxiv.org/pdf/1907.01512.pdf>.

---

*Аверина Лариса Ивановна – д-р физ.-мат. наук, доцент, каф. электроники, Воронежский гос. ун-т, 394018, г. Воронеж, Университетская площадь, 1, e-mail: averina@phys.vsu.ru.*

*Гутерман Никита Евгеньевич – аспирант, каф. электроники, Воронежский гос. ун-т, 394018, г. Воронеж, Университетская площадь, 1, e-mail: n.guterman@internet.ru.*

## COMPARISON OF MACHINE LEARNING-BASED DEMODULATION AND LOG-LIKELIHOOD RATIO ALGORITHM FOR DVB-S2 STANDARD

*The log-likelihood ratio estimator of soft decisions for demodulator output in DVB-S2 standard and its possible approximations are described in this article. A machine learning-based algorithm is suggested. The performance of the latter is illustrated by frame error rate.*

**Keywords:** machine learning, demodulation of multi-position signals, artificial neural networks, DVB-S2

*Averina Larisa Ivanovna – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Full Professor, Department of Electronics, Voronezh State University, 394018, Voronezh, Universitetskaya Sq., 1, e-mail: averina@phys.vsu.ru.*

*Guterman Nikita Evgenievich – graduate student, Department of Electronics, Voronezh State University, 394018, Voronezh, Universitetskaya Sq., 1, e-mail: n.guterman@internet.ru.*

УДК 621.372.62

Г.Н. Якушевич

### АЛГОРИТМ СИНТЕЗА И АНАЛИЗА ВОСЬМИПОЛЮСНИКОВ НАПРАВЛЕННЫХ ОТВЕТВИТЕЛЕЙ НА СВЯЗАННЫХ ПОЛОСКОВЫХ ЛИНИЯХ ПЕРЕДАЧИ

*Приведен алгоритм синтеза и анализа восьмиполюсников, позволяющий в матричном виде проводить синтез и анализ направленных ответвителей на связанных полосковых линиях передачи. Представлены результаты расчетов.*

**Ключевые слова:** алгоритм, синтез, анализ, восьмиполюсник, направленный ответвитель, связанные полосковые линии передачи

Направленные ответвители (НО) нашли широкое применение в приемопередающих трактах радиоэлектронных систем, диаграммообразующих устройствах активных фазированных антенных решеток, содержащих разветвители, сумматоры, фазовращатели, усилители на основе НО [1–6].

НО представляет собой согласованное, взаимное без потерь реактивное устройство с четырьмя парами полюсов. У него все полюса согласованы и при возбуждении одной пары полюсов, условно обозначаемых входными, вся энергия передается в два выходных полюса, при

этом в четвертое плечо, называемое развязанным, энергия не передается.

На рисунке 1 приведена схема восьмиполюсника. Матрица  $S$ -параметров восьмиполюсника записывается в виде

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где диагональные элементы – это коэффициенты отражения полюсов, а не диагональные – взаимные коэффициенты передачи полюсов.

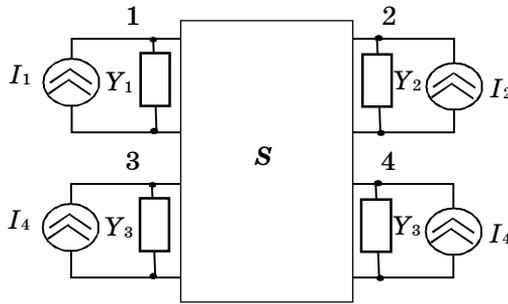


Рисунок 1 – Схема восьмиполюсника, описываемого  $S$ -параметрами

**Алгоритм синтеза восьмиполюсника НО на связанных полосковых линиях.** Задача параметрического синтеза состоит в нахождении номиналов элементов принципиальной схемы НО, построенной по структурной схеме на основе требуемых параметров.

На рисунке 2 приведена принципиальная схема НО на связанных полосковых линиях.

Алгоритм синтеза восьмиполюсника НО на связанных полосковых линиях заключается в следующем.

1. Записывается нормированная матрица  $S$ -параметров согласованного реактивного восьмиполюсника НО на связанных полосковых линиях [7]:

$$S_H = \begin{bmatrix} 0 & |S_{12}| \exp(j\Theta_{12}) & |S_{13}| \exp(j\Theta_{13}) & 0 \\ |S_{21}| \exp(j\Theta_{21}) & 0 & 0 & |S_{24}| \exp(j\Theta_{24}) \\ |S_{31}| \exp(j\Theta_{31}) & 0 & 0 & |S_{34}| \exp(j\Theta_{34}) \\ 0 & |S_{42}| \exp(j\Theta_{42}) & |S_{43}| \exp(j\Theta_{43}) & 0 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где  $S_{nm}$  – коэффициенты передачи между узлами  $n$  и  $m$ ;  $\Theta_{nm}$  – электрическая длина полосковой линии, включенной между узлами  $n$  и  $m$ .

При этом условие согласования имеет вид  $|S_{12}|^2 + |S_{13}|^2 = 1$ ,  
 $|S_{21}|^2 + |S_{31}|^2 = 1$ .

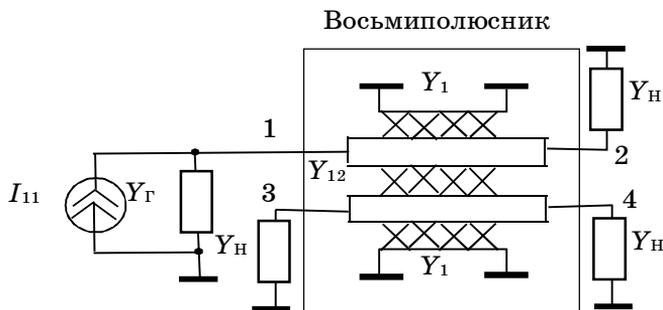


Рисунок 2 – Принципиальная схема направленного ответвителя на связанных полосковых линиях

2. Используя в матричном виде формулу перехода от матрицы  $S$ -параметров (2) к нормированной матрице  $Y_H$ -параметров принципиальной схемы, приведенной на рисунке 2, находим

$$Y_H = 2(S_H + E)^{-1} - E, \quad (3)$$

где  $E = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$  – единичная диагональная матрица.

Запишем выражение (3) в развернутом виде [8]:

$$Y_H = \begin{bmatrix} -i \frac{g_1}{\operatorname{tg}(\Theta_1)} - i \frac{g_{12}}{\operatorname{tg}(\Theta_{12})} & i \frac{g_1}{\sin(\Theta_1)} + i \frac{g_{12}}{\sin(\Theta_{12})} & i \frac{g_{12}}{\operatorname{tg}(\Theta_{12})} & -i \frac{g_{12}}{\sin(\Theta_{12})} \\ i \frac{g_1}{\sin(\Theta_1)} + i \frac{g_{12}}{\sin(\Theta_{12})} & -i \frac{g_1}{\operatorname{tg}(\Theta_1)} - i \frac{g_{12}}{\operatorname{tg}(\Theta_{12})} & -i \frac{g_{12}}{\sin(\Theta_{12})} & i \frac{g_{12}}{\operatorname{tg}(\Theta_{12})} \\ i \frac{g_{12}}{\operatorname{tg}(\Theta_{12})} & -i \frac{g_{12}}{\sin(\Theta_{12})} & -i \frac{g_2}{\operatorname{tg}(\Theta_2)} - i \frac{g_{12}}{\operatorname{tg}(\Theta_{12})} & i \frac{g_2}{\sin(\Theta_2)} + i \frac{g_{12}}{\sin(\Theta_{12})} \\ -i \frac{g_{12}}{\sin(\Theta_{12})} & i \frac{g_{12}}{\operatorname{tg}(\Theta_{12})} & i \frac{g_2}{\sin(\Theta_2)} + i \frac{g_{12}}{\sin(\Theta_{12})} & -i \frac{g_2}{\operatorname{tg}(\Theta_2)} - i \frac{g_{12}}{\operatorname{tg}(\Theta_{12})} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где  $g_{nm}$  – проводимость связанных полосковых линий НО, включенных между узлами  $n$  и  $m$ .

3. Переходим от нормированной матрицы  $Y_H$ -параметров (3) к ненормированной матрице  $Y$ -параметров:

$$Y = R^{-1}Y_H R^{-1}, \quad (5)$$

$$\text{где } R = \begin{bmatrix} \sqrt{R_T} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sqrt{R_H} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{R_H} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sqrt{R_H} \end{bmatrix}.$$

Полагая значение фазы коэффициентов передачи на центральной частоте равным минус  $90^\circ$ , получим ненормированную матрицу  $Y$ -параметров в виде

$$Y = \begin{bmatrix} 0 & ig_1 + ig_{12} & 0 & -ig_{12} \\ ig_1 + ig_{12} & 0 & -ig_{12} & 0 \\ 0 & -ig_{12} & 0 & ig_2 + ig_{12} \\ -ig_{12} & 0 & ig_2 + ig_{12} & 0 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Из матрицы (6) найдем значения волновых проводимостей  $g_1$ ,  $g_{12}$ ,  $g_2$  и волновых сопротивлений полосковых линий  $\rho_1 = 1 / g_1$ ,  $\rho_{12} = 1 / g_{12}$ ,  $\rho_2 = 1 / g_2$ .

**Алгоритм анализа восьмиполюсника НО на связанных полосковых линиях.** Задача анализа состоит в расчете частотных характеристик принципиальной схемы НО, значения элементов которой получены в результате параметрического синтеза на центральной частоте.

Алгоритм анализа восьмиполюсника НО на связанных полосковых линиях заключается в следующем.

1. Подставляя в матрицу проводимостей (5) значения волновых проводимостей, найденных из матрицы (6), переходим от ненормированной матрицы  $Y$ -параметров к нормированной матрице  $Y_H$ -параметров:

$$Y_H = RYR. \quad (7)$$

2. Задавая значения фазы  $\theta$  коэффициентов передачи, рассчитываем частотные характеристики принципиальной схемы НО на связанных полосковых линиях:

$$S_H = 2(Y_H + E)^{-1} - E.$$

Алгоритм синтеза и анализа восьмиполосников НО на связанных полосковых линиях реализован в Mathcad.

В таблице 1 для коэффициентов передачи  $S_{13}$  и  $S_{12}$  приведены рассчитанные нормированные значения волновых сопротивлений полосковых линий.

Таблица 1 – Параметры синтезированного направленного ответвителя

$S_{13}$ , дБ	-0,5	-1,0	-1,5	-2,0	-2,5	-3,0	-4,0	-6,0	-8,0	-10	-15	-20
$S_{12}$ , дБ	-9,6	-6,7	-5,3	-4,3	-3,6	-3,0	-2,2	-1,3	-0,75	-0,45	-0,15	-0,05
$\rho_1$	5,88	4,16	3,41	2,95	2,64	2,41	2,1	1,73	1,52	1,39	1,2	1,11
$\rho_2$	0,35	0,51	0,64	0,76	0,88	1,00	1,23	1,73	2,3	3,0	5,5	9,95

На рисунке 3 показана принципиальная схема синтезированного восьмиполосника НО на связанных полосковых линиях. Входной сигнал подается на полюс 1 и поступает на полюса 2 и 3 в виде квадратурных сигналов. На полюс 4 сигнал не передается.

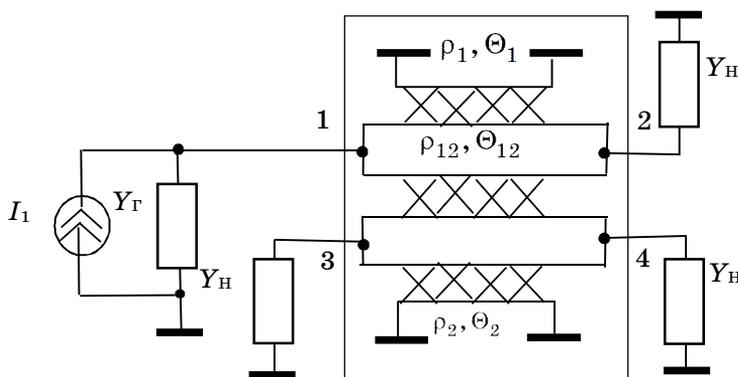


Рисунок 3 – Принципиальная схема синтезированного направленного ответвителя на связанных полосковых линиях

На рисунке 4 приведены зависимости  $S$ -параметров НО на связанных полосковых линиях с электрической длиной  $\Theta_1 = \Theta_{12} = \Theta_2$  с полученными в результате синтеза нормированными номиналами волновых сопротивлений  $\rho_1 = 2,4$ ,  $\rho_2 = 2,4$  и  $\rho_{12} = 1$ . На центральной частоте коэффициенты передачи  $S_{12} = S_{13} = -3$  дБ.

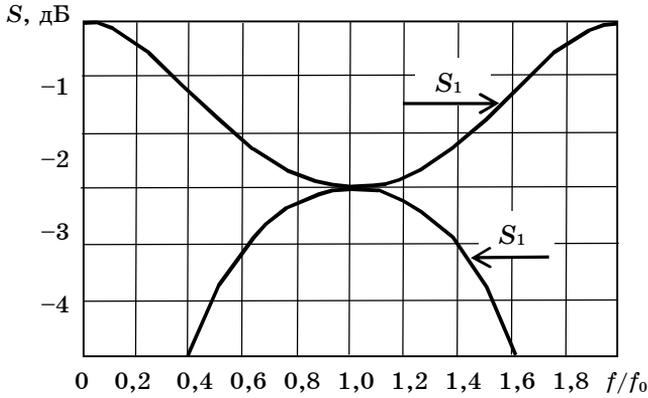


Рисунок 4 –  $S$ -параметры направленного ответвителя на связанных полосковых линиях при  $S_{12} = S_{13} = -3$  дБ на центральной частоте

На рисунке 5 приведены зависимости  $S$ -параметров НО на связанных полосковых линиях с электрической длиной  $\Theta_1 = \Theta_{12} = \Theta_2$  с полученными в результате синтеза нормированными номиналами волновых сопротивлений  $\rho_1 = 2,64$ ,  $\rho_2 = 2,64$  и  $\rho_{12} = 0,88$ . На центральной частоте коэффициенты передачи  $S_{12} = -3,6$  дБ,  $S_{13} = -2,5$  дБ.

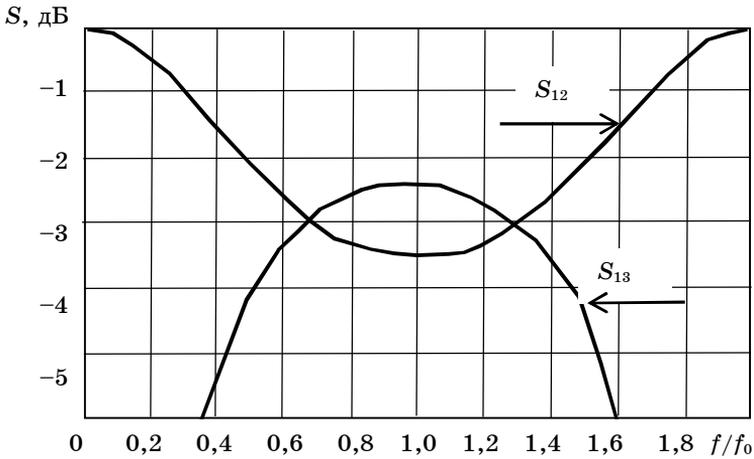


Рисунок 5 –  $S$ -параметры направленного ответвителя на связанных полосковых линиях при  $S_{12} = -3,5$  дБ и  $S_{13} = -2,5$  дБ на центральной частоте

На рисунке 6 приведены зависимости  $S$ -параметров НО на связанных полосковых линиях с коэффициентами передачи  $S_{12} = -0,05$  дБ и  $S_{13} = -20$  дБ на центральной частоте.

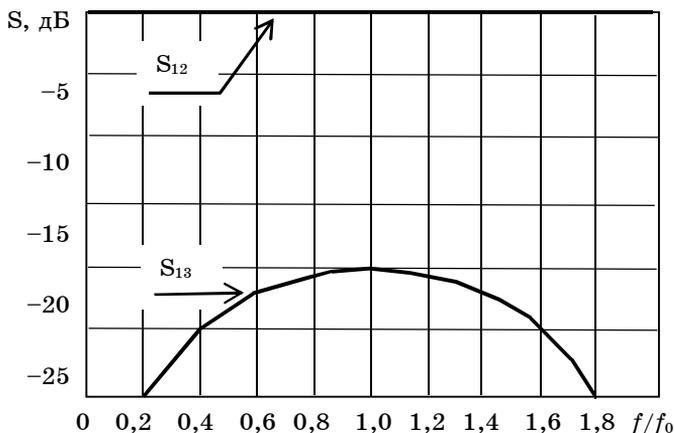


Рисунок 6 –  $S$ -параметры направленного ответвителя на связанных полосковых линиях при  $S_{12} = -0,05$  дБ и  $S_{13} = -20$  дБ на центральной частоте

Таким образом, представленный алгоритм синтеза и анализа восьмиполосников позволяет в матричном виде проводить синтез и анализ направленных ответвителей на связанных полосковых линиях передачи.

### Список использованной литературы

1. Устройства СВЧ : учеб. пособие / Д.М. Сазонов [и др.] ; под ред. Д.М. Сазонова. М. : Высш. шк., 1981. 295 с.
2. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ : учеб. пособие для радиотехнических вузов. М. : Высш. шк., 1988. 432 с.
3. Микроэлектронные устройства СВЧ : учеб. пособие для радиотехнических специальностей/ Г.Н. Веселов, Е.Н. Егоров, Ю.Н. АLEXИН [и др.] : под ред. Г.Н. Веселова. М. : Высш. шк., 1988. 280 с.
4. Фуско В. СВЧ-цепи. Анализ и автоматизированное проектирование : пер. с англ. М. : Радио и связь, 1990. 288 с.
5. Карпов В.М., Малышев В.А., Перевощиков И.В. Широкополосные устройства СВЧ на элементах с сосредоточенными параметрами/ под ред. В.А. Малышева. М. : Радио и связь. 1984. 104 с.
6. Сигорский В.П. Анализ электронных схем. Киев : Гостехиздат, 1960. 200 с.

7. Фельдштейн А.Л., Явич Л.Р. Синтез четырехполосников и восьмиполосников на СВЧ. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Связь, 1971. 388 с.

8. Козлов В.И., Юфит Г.А. Проектирование СВЧ-устройств с помощью ЭВМ. М. : Сов. радио, 1975. 177 с.

---

*Якушев Генадий Николаевич – канд. техн. наук, доцент каф. радиотехнических систем, Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, e-mail: jagn@sibmail.com*

### **ALGORITHM FOR THE SYNTHESIS AND ANALYSIS OF EIGHT-TERMINAL DIRECTIONAL COUPLERS ON COUPLED STRIPLINE TRANSMISSION LINES**

*An algorithm for the synthesis and analysis of eight-terminal networks is presented, which allows in matrix form to carry out the synthesis and analysis of directional couplers on coupled stripline transmission lines. The results of calculations are presented.*

**Keywords:** *algorithm, synthesis, analysis, eight-pole, directional coupler, coupled stripline transmission lines*

*Yakushevich Gennady Nikolaevich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Radio Engineering Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 634050, Tomsk, Lenin Ave., 40, e-mail: gennadii.n.iakushevich@tusur.ru.*

**УДК 004.056**

**Д.Е. Каширский, Е.А. Калачев**

### **РЕАЛИЗАЦИЯ ОСНОВАННОГО НА МАТРИЦЕ ТЁПЛИЦА УСИЛЕНИЯ СЕКРЕТНОСТИ В LABVIEW**

*Рассматривается способ усиления секретности посредством применения матрицы Тёплица для решения задач обеспечения безопасности информации в системах связи. Представлена программная реализация процедуры усиления секретности в LabVIEW. Описаны подходы уменьшения временных затрат на вычисление хеш-функции, основанной на матрице Тёплица.*

**Ключевые слова:** *битовая последовательность, усиление секретности, хеш-функция, матрица Тёплица, LabVIEW*

Одной из задач обеспечения безопасности информации, передаваемой системами связи, является распределение секрета. Два легитимных пользователя, именуемых Алиса и Боб, формируют секретную битовую последовательность, например, с помощью технологий нейронных сетей [1], квантовых технологий [2] и др., которая может быть использована, допустим, в качестве криптографического ключа. Прослушивая этот процесс, злоумышленник, именуемый Ева, становится обладателем информации о части битов данной последовательности, причем Алиса и Боб не знают, какие конкретно биты известны Еве. В результате может произойти компрометация информации, защищаемой методами криптографии. Осуществляя усиление секретности, то есть преобразование битовой последовательности специальным образом, Алиса и Боб обеспечивают уменьшение количества известной о ней информации Еве. Преобразование заключается в сжатии битовой последовательности, для чего применяют хеш-функции [3]. В данной работе рассматривается усиление секретности с применением хеш-функции, основанной на матрице Тёплица [4].

Пусть Алиса и Боб сформировали битовую последовательность длиной  $n$ , которая представляется в виде вектора  $\mathbf{k}$ , а  $\mathbf{T}$  – матрица Тёплица размером  $n \times m$ . Тогда полученный в результате хеширования вектор  $\mathbf{k}^*$ , описывающий сжатую битовую последовательность, определится как

$$\mathbf{k}^* = \begin{bmatrix} k_1^* \\ k_2^* \\ \vdots \\ k_{m-1}^* \\ k_m^* \end{bmatrix} = \mathbf{T} \otimes \mathbf{k} = \begin{bmatrix} t_m & t_{m+1} & \cdots & t_{m+n-1} \\ t_{m-1} & t_m & \cdots & t_{m+n-2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ t_2 & t_3 & \cdots & t_{n+1} \\ t_1 & t_2 & \cdots & t_n \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ \vdots \\ k_{n-1} \\ k_n \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где  $\otimes$  – логическая операция AND;  $\oplus$  – логическая операция XOR.

С вычислительной точки зрения умножение матрицы на вектор в выражении (1) удобнее записать в следующем виде:

$$\mathbf{k}^* = \left( \begin{bmatrix} t_m \\ t_{m-1} \\ \vdots \\ t_2 \\ t_1 \end{bmatrix} \otimes k_1 \right) \oplus \left( \begin{bmatrix} t_{m+1} \\ t_m \\ \vdots \\ t_3 \\ t_2 \end{bmatrix} \otimes k_2 \right) \oplus \cdots \oplus \left( \begin{bmatrix} t_{m+n-2} \\ t_{m+n-3} \\ \vdots \\ t_n \\ t_{n-1} \end{bmatrix} \otimes k_{n-1} \right) \oplus \left( \begin{bmatrix} t_{m+n-1} \\ t_{m+n-2} \\ \vdots \\ t_{n+1} \\ t_n \end{bmatrix} \otimes k_n \right). \quad (2)$$

Можно заметить, что выполнять операцию  $\otimes$  для каждого элемента столбца матрицы в формуле (2) нет необходимости, так как

результат будет определяться значением  $i$ -го элемента вектора  $\mathbf{k}$ . В результате выполнения операции  $\otimes$  будет получаться вектор, все элементы которого равны нулю, либо вектор, элементы которого равны элементам  $i$ -го столбца матрицы  $\mathbf{T}$ , при равенстве  $i$ -го элемента вектора  $\mathbf{k}$  нулю или единице соответственно. Таким образом обеспечивается уменьшение временных затрат на вычисление вектора  $\mathbf{k}^*$ .

Равенство диагональных элементов матрицы Тёплица дает возможность свести ее к вектору

$$\mathbf{t} = [t_1 \ t_2 \ \dots \ t_m \ \dots \ t_{m+n-2} \ t_{m+n-1}], \tag{3}$$

представляющему собой конкатенацию ее первого столбца и первой строки. Первый столбец матрицы Тёплица в формуле (2) получается путем взятия подвектора вектора  $\mathbf{t}$  длиной  $m$ , начиная с элемента  $t_1$ , а последующие столбцы матрицы формируются посредством сдвига подвектора на один элемент вектора  $\mathbf{t}$ . Таким образом, вместо хранения  $n \times m$  элементов матрицы  $\mathbf{T}$  достаточно хранить  $m+n-1$  ее элементов, что значительно снижает требования, предъявляемые к объему памяти, необходимой для вычисления хеш-функции.

На рисунке 1 представлена блок-диаграмма виртуального прибора в LabVIEW, реализующего процедуру усиления секретности, основанную на хешировании с помощью матрицы Тёплица. Блок-диаграмма построена на основе двух циклов For, выполняющихся параллельно.

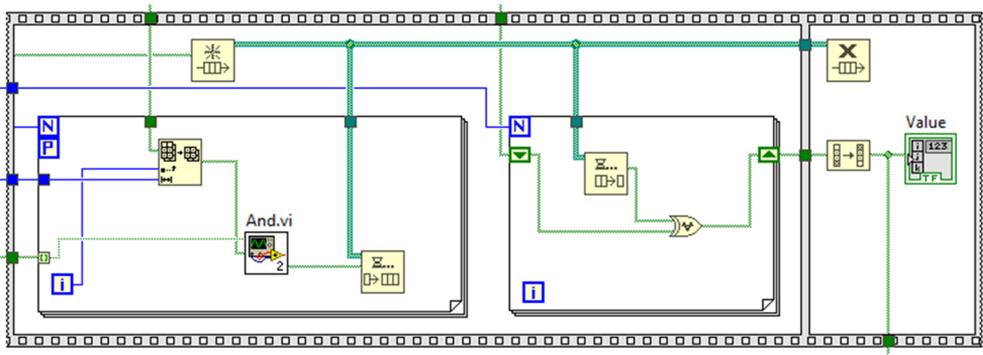


Рисунок 1 – Блок-диаграмма виртуального прибора, выполняющего усиление секретности

Цикл, расположенный слева на рисунке 1, обеспечивает вычисление операции  $\otimes$  в выражении (2). С помощью функции Array Subset из вектора  $\mathbf{t}$  берется подвектор, соответствующий  $i$ -му элементу вектора  $\mathbf{k}$ , которые вместе подаются на вход виртуального прибора And.vi. And.vi с помощью условного оператора Case Structure выдает один из

двух векторов, соответствующих результату выполнения операции  $\otimes$ . Так как выполнение каждой из  $n$  операций  $\otimes$  не зависит друг от друга, то они могут выполняться параллельно. Поэтому рассматриваемый цикл представляет собой параллельный цикл For, о чем свидетельствует наличие терминала P в верхнем левом углу цикла. Такой подход позволяет еще больше сократить время вычисления хеш-функции.

Во втором цикле с помощью функции Exclusive Or выполняется  $n$  операций  $\oplus$  формулы (2). В отличие от операций  $\otimes$ , операции  $\oplus$  могут выполняться только последовательно. Поэтому для синхронизации потоков была задействована очередь, которая создается с помощью Obtain Queue. В первом цикле векторы с выхода And.vi помещаются в очередь посредством Enqueue Element. На каждой итерации второго цикла один вектор извлекается из очереди посредством Dequeue Element и складывается с текущим значением результирующего вектора, которое с помощью сдвигового регистра Shift Register передается в следующую итерацию цикла. Причем если очередь пуста, то выполнение текущей итерации цикла приостанавливается до тех пор, пока в очереди не появится хотя бы один вектор. Так как циклы выполняются за разное время, то уничтожение очереди с помощью Release Queue производится только после того, как завершатся оба цикла. Такое поведение реализовано с помощью последовательности Flat Sequence, состоящей из двух фреймов.

Применение условного оператора для вычисления операций  $\otimes$  (рисунок 2, кривая 1) дает приблизительно двукратное уменьшение времени выполнения усиления секретности по сравнению с непосредственным вычислением операций  $\otimes$  для каждого элемента матрицы Тёплица в формуле (2) (см. рисунок 2, кривая 2). Аналогичный выигрыш дает использование в первом цикле двух потоков вместо одного. Двухпоточное прямое вычисление операций  $\otimes$  (см. рисунок 2, кривая 3) приближается по временным затратам к однопоточному вычислению операций  $\otimes$  с помощью условного оператора (см. рисунок 2, кривая 2). Наименьшие временные затраты на выполнение усиления секретности реализуются при использовании двухпоточной версии вычисления операций  $\otimes$  с помощью условного оператора (см. рисунок 2, кривая 4).

Дальнейшее увеличение количества потоков в первом цикле не приводит к уменьшению времени выполнения усиления секретности (рисунок 3). Это вызвано так называемым эффектом «бутылочного горлышка»: второй цикл выполняется медленнее, чем первый. Поэтому для рассмотренной реализации усиления секретности нет смысла использовать более двух потоков в первом цикле.

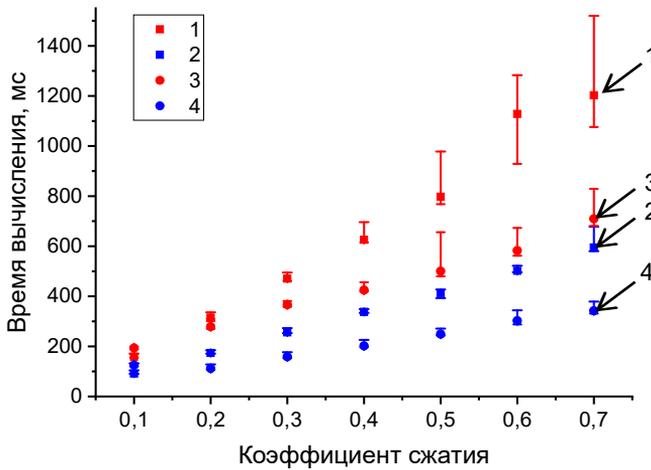


Рисунок 2 – Зависимость времени выполнения усиления секретности от коэффициента сжатия при различных вариантах вычисления хеш-функции

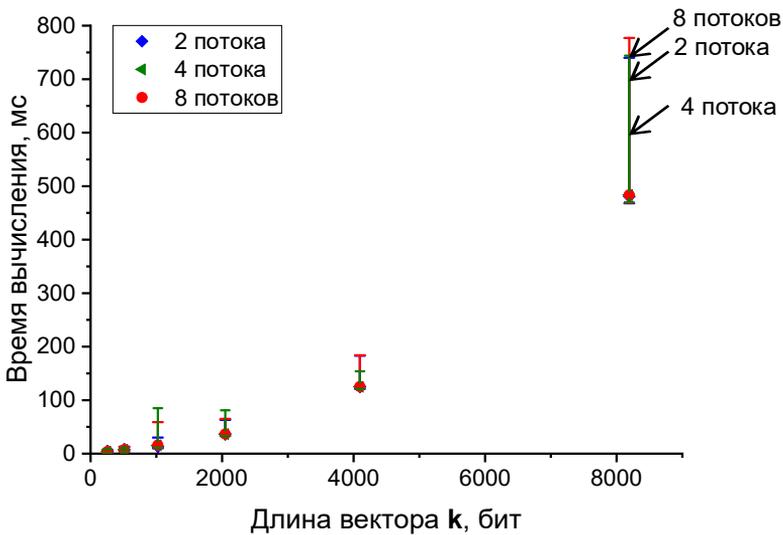


Рисунок 3 – Зависимость времени выполнения усиления секретности от длины входной битовой последовательности при различном количестве вычислительных потоков

*Исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030), проект № 2.0.6.22 ЛМУ.*

## Список использованной литературы

1. Mutual learning in a tree parity machine and its application to cryptography / M. Rosen-Zvi, E. Klein, I. Kanter [et al.] // Physical Review E. 2002. V. 66, N 6. P. 066135.
2. Бауместер Д., Экерт А., Цайлингер А. Физика квантовой информации. М. : Постмаркет, 2002. 376 с.
3. Carter L., Wegman M. Universal classes of hash functions // J. Comput. System Sci. 1979. V. 18, N 2. P. 143–154.
4. Krawczyk H. New Hash Functions for Message Authentication // Lecture Notes in Computer Science. Verlag, Berlin, Heidelberg: Springer. 1995. V. 921: Advances in Cryptology — EUROCRYPT '95 Proceedings. P. 301–310.

---

*Каширский Данила Евгеньевич – канд. физ.-мат. наук, доцент, каф. квантовой электроники и фотоники, радиофизический факультет, Национальный исследовательский Томск. гос. ун-т, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, e-mail: kde@mail.tsu.ru.*

*Калачев Егор Алексеевич – студент, каф. квантовой электроники и фотоники, радиофизический факультет, Национальный исследовательский Томск. гос. ун-т, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, e-mail: kalachiov.76@outlook.com.*

### IMPLEMENTING TOEPLITZ MATRIX-BASED SECURITY IMPROVEMENT IN LABVIEW

*The article discusses the issue of security improvement, based on the use of the Toeplitz matrix, to solve problems of ensuring information security in communication systems. A software implementation of the security improvement procedure in LabVIEW was implemented. Approaches to reducing the time spent on calculating a hash function based on the Toeplitz matrix are considered.*

**Keywords:** *bit sequence, security improvement, hash function, Toeplitz matrix, LabVIEW*

*Kashirskii Danila Evgenievich – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Department of Quantum Electronics and Photonics, Faculty of Radiophysics, National Research Tomsk State University, 634050, Tomsk, Lenin Ave., 36, e-mail: kde@mail.tsu.ru.*

*Kalachev Egor Alekseevich – Student, Department of Quantum Electronics and Photonics, Faculty of Radiophysics, National Research Tomsk State University, 634050, Tomsk, Lenin Ave., 36, e-mail: kalachiov.76@outlook.com.*

А.М. Голиков, А.А. Куранов, Д.В. Скурихин, А.С. Дернова

## ТЕХНОЛОГИЯ LoRaWAN IoT ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ И НАЗЕМНЫХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

*Представлено исследование стеков протоколов передачи информации между оконечными устройствами и базовыми станциями для перспективной многоспутниковой системы интернета вещей «Марафон IoT». Разработана MatLab-модель модулятора LoRa для сети LoRaWAN. Исследована помехоустойчивость модулятора для различных типов каналов передачи данных. Приведены зависимости BER от  $E_b/N_0$  для разных коэффициентов расширения SF в различных типах каналов передачи.*

**Ключевые слова:** «Марафон-IoT», LoRaWAN, LoRa-модулятор, FSK-модулятор, помехоустойчивость

«Марафон IoT» предоставляет ресурс для организации услуги передачи данных, на основе которой формируются многочисленные сервисы для конечных пользователей с учетом синергии услуг и сервисов с иными информационными системами. Многоспутниковая система передачи данных «Марафон IoT» находится в стадии проектирования. На данный момент выполнены этапы технического предложения и эскизный проект. Абонентское устройство «Марафон IoT» используется в совокупности с датчиком физических величин (температура, влажность и т.п.) и приемником ГЛОНАСС (навигационная система).

LoRaWAN (Low-power Wide-area Network – глобальная сеть с низким энергопотреблением) – открытый протокол для сетей с большим количеством сетевых устройств, с большим радиусом действия и низким энергопотреблением, который LoRa Alliance стандартизировал для малопотребляющих мощность сетей [1, 2].

Ключевыми характеристиками LoRaWAN являются:

- скорость передачи данных 300 б/с – 5,5 кб/с;
- покрытие базовой станции в городе 1–3 км, в сельской местности 15 км;
- модуляция Spread spectrum, которая позволяет системе работать на низких уровнях сигнала;
- ширина канала 125 кГц, расстояние между центрами соседних каналов 200 кГц.

С целью исследования модуляции M-FSK [3–5] для LoRaWAN разработана модель в Simulink MatLab (рисунок 1).

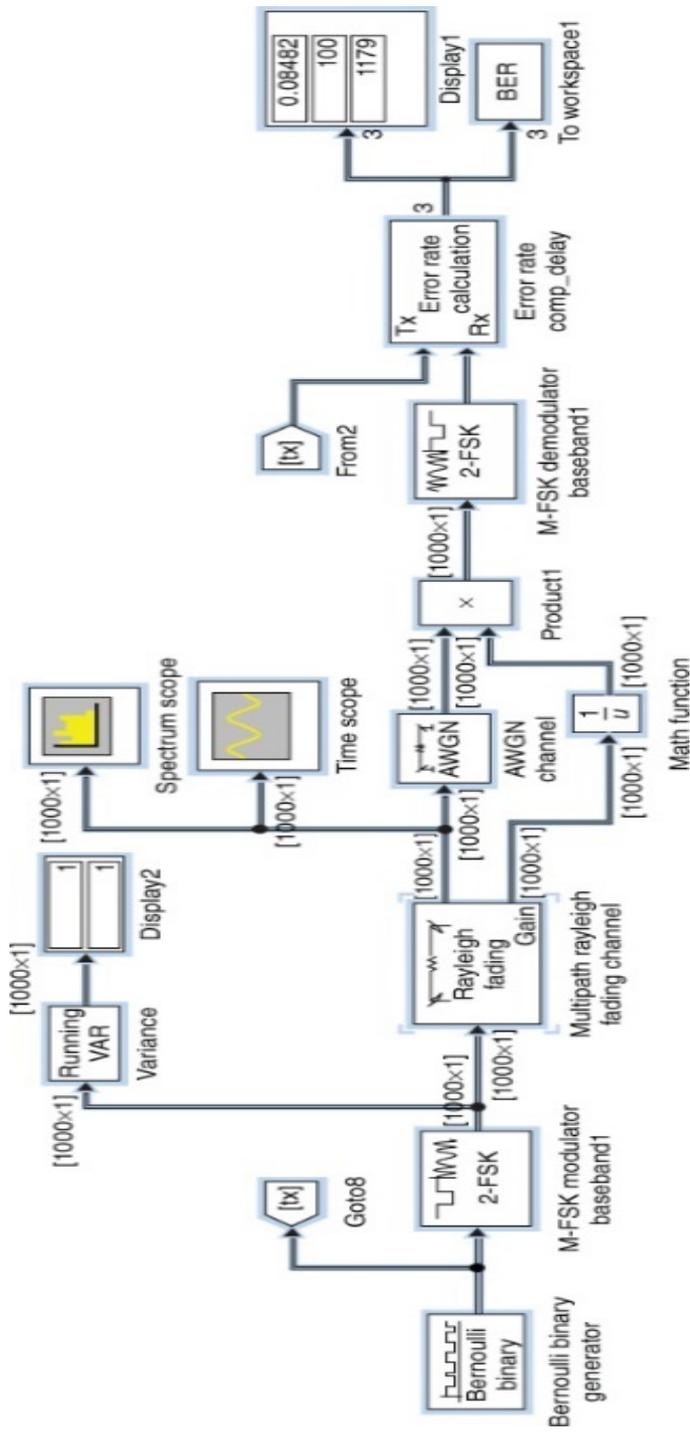


Рисунок 1 – Модель исследования модуляции FSK для LoRaWAN

Проведено исследование модуляции M-FSK для LoRaWAN и помехоустойчивости системы IoT LoRaWAN (рисунки 2 и 3).

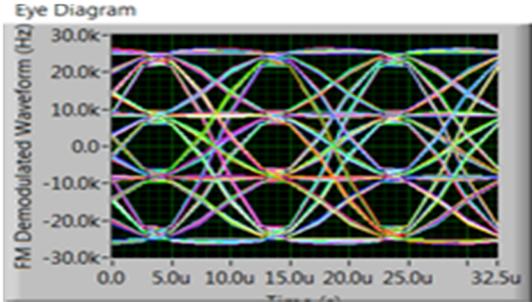


Рисунок 2 – Глазковые диаграммы при уровне модуляции M = 4

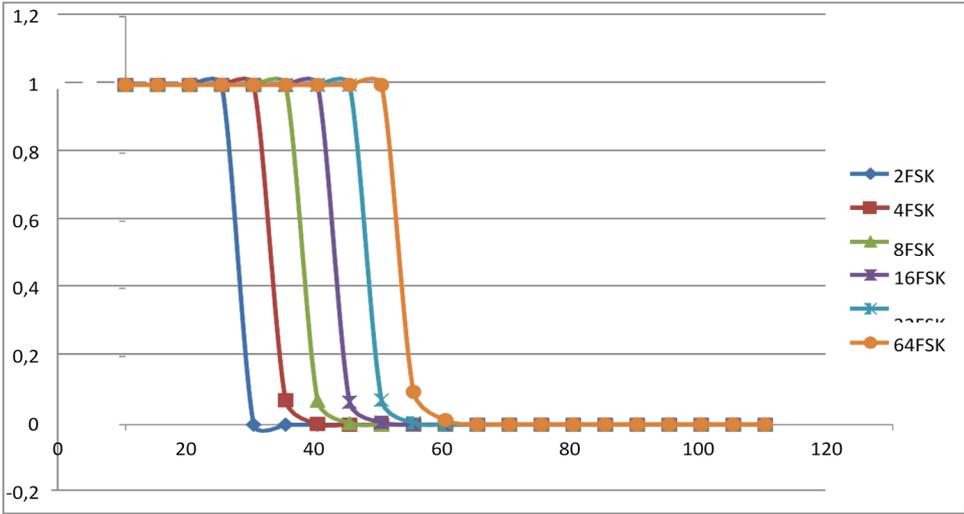


Рисунок 3 – Зависимости BER от SNR

Разработанная модель позволяет наглядно оценить работоспособность и устойчивость сигнально-кодовых конструкций, применяемых в стеке протоколов LoRaWAN, с учетом реальной помеховой обстановки на линии «Космос – Земля».

Одной из ключевых особенностей протокола LoRaWAN является применение LoRa-модуляции, позволяющей передавать сигнал ниже уровня шума. На рисунке 4 представлена структурная схема глобальной IoT-сети с использованием LoRa [6].

Модуляция LoRa является подвидом линейной частотной модуляции (ЛЧМ). Каждый символ кодируется циклическим сдвигом чирпа

(гармонического сигнала с линейно возрастающей частотой) во времени. Параметрами LoRa-модуляции являются полоса пропускания и коэффициент расширения SF. Коэффициент расширения определяет число  $N$  чирпов для передачи символа:  $N = 2^{SF}$ .

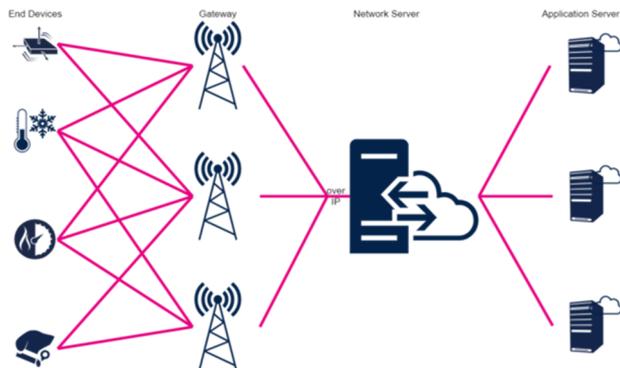


Рисунок 4 – Структурная схема глобальной сети с использованием технологии LoRa

Помимо измерения помехоустойчивости, был изучен спектр сигнала с LoRa-модуляцией при разных коэффициентах расширения. Полученные спектры представлены на рисунке 5.

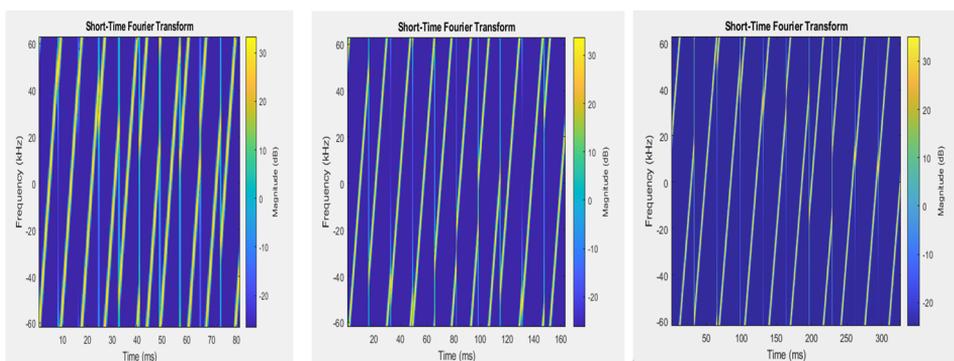


Рисунок 5 – Спектр ЛЧМ-сигнала LoRa при коэффициентах расширения SF = 10, 11, 12

На рисунке 6 представлены водопадоподобные кривые помехоустойчивости сигнала с LoRa-модуляцией при различных коэффициентах расширения SF. Видно, что при увеличении коэффициента расширения возрастает помехоустойчивость модулированного сигнала.

Для исследования LoRa-модулятора разработана схема алгоритмов, а также программный код для ПО MatLab.

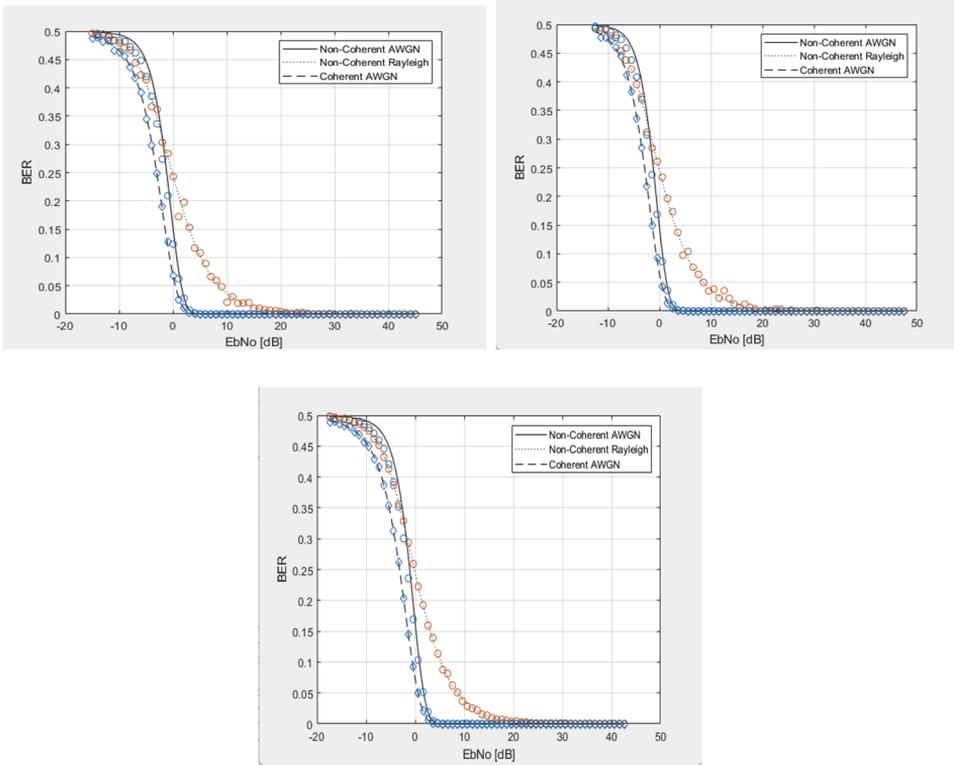


Рисунок 6 – Зависимости BER от  $E_b / N_0$  для коэффициентов расширения SF = 10, 11, 12

### Список использованной литературы

1. A technical overview of LoRa and LoRaWAN. URL: <https://loralliance.org/wp-content/uploads/2020/11/what-is-lorawan.pdf>.
2. IOT VEGA Производитель LoraWAN устройств. URL: <https://iotvega.com>.
3. Голиков А.М. Системы цифровой радиосвязи : учеб. М. : Ай Пи Ар Медиа, 2022. 340 с.
4. Голиков А.М. Модуляция, кодирование и моделирование в телекоммуникационных системах. Теория и практика : учеб. пособие для вузов. 3-е изд. СПб. : Лань, 2022. 452 с.
5. Голиков А.М. Исследование цифровых модуляций сотовой связи FSK и MSK : учеб.-метод. пособие по лабораторной работе. Томск : Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2019. 24 с. URL: <https://edu.tusur.ru/publications/9176>.
6. Тихвинский В.О., Коваль В.А., Бочечка Г.С., Бабин А.И. Сети IoT/M2M: технологии, архитектура и приложения. М. : Медиа Паблшер, 2017. 320 с.

---

*Голиков Александр Михайлович – канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, доцент, каф. радиотехнических систем, Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, e-mail: rts2\_golikov@mail.ru.*

*Куранов Александр Андреевич – магистрант, каф. радиотехнических систем, Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, e-mail: rts2\_golikov@mail.ru.*

*Скурихин Даниил Вадимович – студент, каф. радиотехнических систем, Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, e-mail: rts2\_golikov@mail.ru.*

*Дернова Алина Сергеевна – студент, каф. радиотехнических систем, Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, e-mail: rts2\_golikov@mail.ru.*

## **LORAWAN IOT TECHNOLOGY FOR SPACE AND TERRESTRIAL TELEMETRY TRANSMISSION SYSTEMS**

*The paper studies the stacks of protocols for transmitting information between terminal devices and base stations for a promising multi-satellite system of the Internet of Things «Marathon IoT». A list of basic technical requirements for scientific equipment has been defined to support the experimental testing of the provision of the Internet of Things service. The results of the research can be used in the design of the «Marathon-IoT» multi-satellite data transmission system (MSTS) developed by the JSC ISS enterprise. The principles of the Internet of Things technology, existing and future standards (protocols) for the provision of data transmission services are considered. This work allows you to visually evaluate the performance and stability of the signal-code structures used in the LoRaWAN protocol stack, taking into account the real interference situation on the Space-to-Earth line. A Matlab model of the LoRa modulator for the LoRaWAN network has been developed. A study of the noise immunity of the modulator for various types of data transmission channels was carried out. The dependences of BER on  $E_b/N_0$  are studied for different spreading factors (SF) in different types of transmission channels.*

**Keywords:** «Marathon-IoT», LPWAN network, LoRaWAN, LoRa modulator, FSK modulator, Noise immunity

*Golikov Alexander Mikhailovich – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Associate Professor of the Department of Radio Engineering Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 634050, Tomsk, Lenin Ave., 40, e-mail: rts2\_golikov@mail.ru.*

*Kuranov Alexander Andreevich – student of the Department of Radio Engineering Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 634050, Tomsk, Lenin Ave., 40, e-mail: rts2\_golikov@mail.ru.*

*Skurikhin Daniil Vadimovich – student of the Department of Radio Engineering Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 634050, Tomsk, Lenin Ave., 40, e-mail: rts2\_golikov@mail.ru.*

*Dernova Alina Sergeevna – student of the Department of Radio Engineering Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 634050, Tomsk, Lenin Ave., 40, e-mail: rts2\_golikov@mail.ru.*

## Секция 4. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

---

УДК 004.032.26

Б.Ф. Ноздреватых, Д.О. Ноздреватых, В.Ю. Куприц, В.И. Вебер

### АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПЛАТФОРМ ДЛЯ СОЗДАНИЯ СИСТЕМ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

*Анализируются отечественные и зарубежные платформы искусственного интеллекта.*

**Ключевые слова:** платформы искусственного интеллекта, машинное обучение, нейронные сети

Множество компаний и институтов выполняет свои задачи и функции с применением систем искусственного интеллекта (ИИ). Классифицировать такие компании можно методом, предложенным Ауреном Хофманом (Auren Hoffman): Superrich (сверхбогатые), Servicers (обслуживающие) и Innovators (инноваторы) [1].

Сверхбогатые компании обычно занимаются технологиями ИИ и обладают своими данными. К ним относятся Google, Facebook, Baidu, Tencent, Amazon, Microsoft и т.п. Их в мире немного, но у них есть доступ к огромным обработанным базам данных, что позволяет развивать различные системы искусственного интеллекта.

Обслуживающие компании перерабатывают базы данных. Они являются сервисными, поскольку не имеют своих данных, но работают с данными своих клиентов. Например, IBM, HP, Oracle и другие консалтинговые компании улучшают крупным компаниям ценообразование, логистику, обслуживание клиентов и т.п.

Инноваторы сосредоточены на решении специфической проблемы, но не имеют своих данных и не оказывают сервисных услуг другим компаниям. Таким компаниям приходится после приобретения данных чистить их, объединять, то есть проводить предварительные процедуры ETL, прежде чем начать работать с ними.

Компании из категории Superrich обладают могущественными преимуществами перед остальными. Однако можно предположить, что, поскольку доступ к данным становится все более демократичным, компании из двух остальных групп будут развиваться высокими темпами.

По мнению экспертов IDC, такие компании, как Amazon, Alphabet, IBM и Microsoft, будут обладать 60 % платформ ИИ. Сейчас эти

компании также доминируют в бизнесе, связанном с облачными вычислениями.

Что касается объема рынка искусственного интеллекта, то в J'son & Partners Consulting (J&P) провели анализ прогнозов ведущих консалтинговых компаний и предоставили статистику (рисунок 1) [2].



Рисунок 1 – Пример преобразования приложения Discord при использовании CSS

Как следует из рисунка 1, ожидается стабильный рост рынка искусственного интеллекта в краткосрочной перспективе. В связи с бурным развитием и популяризацией искусственных нейронных сетей растет количество запросов на расширение и поиск новых сфер для применения данной технологии. Сейчас есть ряд компаний, которые разработали собственные платформы, позволяющие создавать, обучать нейронные сети. Необходимо выделить решения, которые позволяют осуществлять инференс<sup>1</sup> моделей ИИ. Официально программно-аппаратные решения таких компаний платформами не называются, это отдельные продукты, которые тесно вплетены в продуктовую инфраструктуру материнских компаний. Действительно, большинство игроков, предоставляющих возможность работать с нейронными сетями, являются провайдерами облачных решений: виртуальных машин, хранилищ данных, серверов баз данных, систем мониторинга и т.п. Не стоит забывать, что любой продукт имеет свой жизненный цикл, поэтому нет ничего необычного в том, что часть сервисов закрывается, часть переходит под управление других компаний вследствие покупок или поглощений. Если конечный пользователь сосредоточивает свое

---

<sup>1</sup> Инференс – общепринятый термин, который означает непрерывное исполнение нейронных сетей на конечном аппаратно-программном устройстве [3].

внимание на конкретном решении конкретного поставщика, то возникает ситуация, которую называют «привязка к поставщику» (vendor lock-in) [3]. Само состояние привязки к определенному поставщику является недостатком, так как в долгосрочной перспективе может привести к остановке операционной деятельности и финансовым потерям.

В качестве самых распространенных примеров сервисов и клиентских приложений или программных интерфейсов приложений можно выделить платформы и сервисы компаний Google, Microsoft и Amazon, а также их отечественные аналоги Яндекс Облако, VK Cloud, SberCloud и нескольких других. Ниже будут подробнее рассмотрены указанные платформы.

Облачная платформа Google (Google Cloud Platform) и ее облачный сервис машинного обучения (cloud machine learning engine) вместе с библиотекой для создания клиентского приложения и подключения к данному сервису (Google Cloud Machine Learning Engine Client Library for Python) предоставляет относительно небольшой набор готовых решений по машинному обучению, что ограничивает возможность модернизации. Сервис платный, есть стартовый грант в размере 300\$, чтобы начать использовать данный сервис [4].

Облачные веб-сервисы Amazon (amazon web services) и продукт по удаленному машинному обучению (Amazon Machine Learning), а также SDK (software development kit) – это комплект средств разработки (AWS SDK, AWS Mobile SDK) и интерфейс командной строки (CLI) AWS.

Сервис предоставляет протокол взаимодействия с сервером для запуска модели обучения. Входные данные для обучения берутся в основном из набора данных. Целью обучения является именно прогнозирование последующих значений на определенном наборе параметров [5].

Облачная платформа Microsoft Azure Machine Learning и несколько способов взаимодействия, таких как Azure portal и Azure Machine Learning Studio, поставляют различные методы и математические аппараты машинного обучения, что позволяет расширить источники входных данных [6].

Yandex Cloud представляет собой набор связанных сервисов, которые помогут конечному пользователю и компаниям быстро и безопасно взять в аренду вычислительные мощности в тех объемах, в которых это необходимо. При этом доступ к вычислительным мощностям осуществляется через интернет. Такой подход к потреблению вычислительных ресурсов называется облачными вычислениями [7].

Облачные вычисления заменяют и дополняют традиционные дата-центры, расположенные на территории потребителя. В рамках всей инфраструктуры Яндекса Облака выделяется специализированный сервис для машинного обучения – Yandex DataSphere. Это сервис для ML-разработки полного цикла, который позволяет использовать все

преимущества облачных технологий, сочетая в себе простой и понятный веб-интерфейс, привычные IDE и возможность бесшовного использования разных конфигураций вычислительных ресурсов Yandex Cloud [8].

Платформа для полного цикла ML-разработки и совместной работы Data-команд от VK Cloud называется ML Platform. В её основе находится создание и работа с инстансами JupyterHub (инструмент для работы с Jupyter Notebook в многопользовательском режиме) и MLflow (инструмент для решения задач трекинга и версионирования экспериментов, ML-моделей).

MLOps Platform от VK Cloud представляет собой набор сервисов и инструментов, предназначенных для решения типовых задач Data Science и ML-команд [9].

MLOps можно определить как дисциплину или набор практик, целью которых является деплой и поддержка сервисов на основе ML-моделей. Эта дисциплина родилась на стыке сфер Machine Learning, DevOps и Data Engineering. MLOps-задачи обычно включают в себя проведение экспериментов с данными, тренировку ML-моделей, деплой полученных ML-моделей в различные среды, мониторинг поведения моделей в готовом продукте, обновление эксплуатируемых ML-моделей.

ML Space – облачная платформа полного цикла разработки и реализации AI-сервисов для бизнеса любого размера. Она содержит все необходимые инструменты и ресурсы для создания, обучения и развёртывания моделей машинного обучения – от быстрого подключения к источникам данных до автоматического развёртывания обученных моделей на динамически масштабируемых высокопроизводительных мощностях SberCloud [10].

ML Space подходит для end-to-end ML-разработки в облаке и on-premise. Экономит до 30 % рабочего времени специалистов. Сокращает время разработки и time-to-market моделей в несколько раз. Повышает уровень ML-зрелости проектов. Защищает от утечек информации. Встраивается в ландшафт информационной безопасности компании [11]. Во всех сценариях может быть построена информационная система, отвечающая любым требованиям информационной безопасности компании [12].

BAUM AI представляет собой высокопроизводительную доверенную систему хранения данных большой емкости, обеспечивающую высокий уровень производительности, гибкости, масштабируемости, отказоустойчивости, а также платформу прикладного искусственного интеллекта. Она сочетает оптимизированные аппаратные решения и уникальный софт собственной разработки, который позволяет создавать, обучать или использовать предобученные модели искусственного интеллекта без необходимости прямого кодирования по принципу

Drag&Drop. На ее базе функционирует киберполигон цифрового материаловедения [13].

Компания «Базис» (СП «Облачная платформа») – разработчик программных продуктов для оказания облачных услуг и платформы динамической инфраструктуры. Она образована компаниями «Ростелеком», YADRO и GS Invest/Rubytch. Результатом объединения стала интеграция экспертиз разработчиков и появление единого продуктового портфеля для рынка PaaS и IaaS [14].

Google Colab предоставляет конечному пользователю интерфейс Jupyter Notebook и т.п. [15].

Kaggle, дочерняя компания Google LLC, представляет собой онлайн-сообщество специалистов по обработке данных и специалистов по машинному обучению. Kaggle позволяет пользователям находить и публиковать наборы данных, исследовать и создавать модели в веб-среде data-science, сотрудничать с другими специалистами по обработке данных и инженерами машинного обучения, а также участвовать в конкурсах для решения задач data science [16].

Jupyter Notebook – интерактивная среда разработки с «живым» кодом. В ней показана визуализация работы [17].

Visual Studio Code (VS Code) – это редактор кода для разных языков программирования. Он относительно немного весит, гибкий и удобный. В нем можно писать, форматировать и редактировать код на разных языках [18].

Если рассматривать в целом, то платформа для машинного обучения состоит из серверов с графическими картами, виртуальных или аппаратных машин, системы хранения данных, системы версионирования, систем баз данных и т.д. Каждая платформа представляет отдельный продукт более крупной инфраструктуры компании, оказывающей услуги облачных вычислений. При выборе платформы необходимо обращать внимание на три основных момента: 1) стоимость эксплуатации сервиса; 2) информационная безопасность; 3) отсутствие привязки к конкретному поставщику услуг.

Можно выбрать одно из существующих на рынке решений, но надо быть готовым к финансовым затратам на эксплуатацию данной платформы, причем стоимость может существенно меняться в зависимости от курса национальной валюты. Платформа может прекратить своё существование, так как заканчивается её жизненный цикл. Платформу могут взломать и похитить информацию пользователей, а это модели, датасеты и натренированные нейронные сети. Кроме того, платформу, принадлежащую провайдеру услуг, невозможно гибко настраивать под свои задачи и потребности. Поэтому принято решение создать собственный программно-аппаратный комплекс автоматизации проектирования систем искусственного интеллекта.

## Список использованной литературы

1. Гурко Д.М. Роль технологий искусственного интеллекта в транс-национализации мировой экономики // Инновационная экономика и менеджмент: методы и технологии : сб. ст. участников IV Междунар. науч.-практ. конф., Москва, 15–16 мая 2019 года. М. : Моск. гос. ун-т им. М.В. Ломоносова, Издательский Дом (типография). 2019. С. 237–242. EDN OBLNPK.

2. Искусственный интеллект (ИИ) / Artificial Intelligence (AI) как ключевой фактор цифровизации глобальной экономики. URL: [http://json.tv/ict\\_telecom\\_analytics\\_view/iskusstvennyu-intellekt-ii-artificialintelligence-ai-kak-klyuchevoy-faktor-tsfrovizatsii-globalnoy-ekonomiki-20170222045241](http://json.tv/ict_telecom_analytics_view/iskusstvennyu-intellekt-ii-artificialintelligence-ai-kak-klyuchevoy-faktor-tsfrovizatsii-globalnoy-ekonomiki-20170222045241) (дата обращения: 15.03.2023).

3. Nuc Server – сервер для инференса нейронных сетей. URL: <https://nucserver.ru/> (дата обращения: 14.07.2023).

4. Привязка к поставщику. Сайт Википедия. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Привязка\\_к\\_поставщику](https://ru.wikipedia.org/wiki/Привязка_к_поставщику) (дата обращения: 14.07.2023).

5. Google Cloud Machine Learning. URL: <https://cloud.google.com/ml-engine/docs/tutorials/python-guide> (дата обращения: 25.06.2023).

6. Amazon Machine Learning. URL: <https://aws.amazon.com/machine-learning/> (дата обращения: 13.07.2023).

7. Microsoft Azure Machine Learning. URL: <https://azure.microsoft.com/en-us/services/machine-learning/> (дата обращения: 13.07.2023).

8. Обзор платформы Yandex Cloud. Официальная документация сервиса. URL: <https://cloud.yandex.ru/docs/overview/> (дата обращения: 14.07.2023).

9. Yandex DataSphere. Официальная документация сервиса. URL: <https://cloud.yandex.ru/docs/overview/> (дата обращения: 14.07.2023).

10. Концепции MLOps Platform от VK Cloud. Официальная документация сервиса VK Cloud. URL: <https://mcs.mail.ru/docs/ru/ml/mlplatform/concepts> (дата обращения: 14.07.2023).

11. ML Space. URL: <https://www.tadviser.ru/index.php/> (дата обращения: 17.05.2023).

12. BAUM AI. URL: <https://projects.2035.university/project/programmno-apparatnyj-kompleks-integracionnaa-platforma-ii-baum-ai> (дата обращения: 17.05.2023).

13. Описание Basis. URL: <https://www.tadviser.ru/index.php/> (дата обращения: 18.05.2023).

14. Сайт Basis. URL: <https://basistech.ru/> (дата обращения: 18.05.2023).

15. Описание Google Colab. URL: <https://www.hwlibre.com/ru> (дата обращения: 19.05.2023).

16. Описание Kaggle. URL: [https://translated.turbopages.org/проху\\_u/en-ru.ru.c0419816-646e4ccb-bcf4fcac-74722d776562/https/en.wikipedia.org/wiki/Kaggle](https://translated.turbopages.org/проху_u/en-ru.ru.c0419816-646e4ccb-bcf4fcac-74722d776562/https/en.wikipedia.org/wiki/Kaggle) (дата обращения: 21.05.2023).

17. Описание Jupiter Notebook. URL: <https://sky.pro/media/jupyter-notebook-chto-eto-takoe-i-kak-im-polzovatsya/> (дата обращения: 21.05.2023).

18. Описание Visual Studio Code. URL: <https://blog.skillfactory.ru/glossary/visual-studio-code/> (дата обращения: 22.11.2022).

---

*Ноздреватых Борис Федорович – инженер СКБ «Интеллектуальные радиотехнические системы», Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, e-mail: nbf152@yandex.ru.*

*Ноздреватых Дарья Олеговна – инженер СКБ «Интеллектуальные радиотехнические системы», Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, e-mail: ohdo.tusur@yandex.ru.*

*Куприц Владимир Юрьевич – канд. техн. наук, доцент, каф. радиотехнических систем, Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, e-mail: vladimir.y.kuprits@tusur.ru.*

*Вебер Владислав Игоревич – инженер СКБ «Интеллектуальные радиотехнические системы», Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, e-mail: vladislav.i.veber@tusur.ru.*

## **ANALYTICAL REVIEW OF THE POSSIBILITIES OF PLATFORMS FOR CREATING ARTIFICIAL INTELLIGENCE SYSTEMS**

*The article considers the possibilities of existing domestic and foreign platforms for creating artificial intelligence systems.*

**Keywords:** *platforms for creation of artificial intelligence systems, automation of systems design, machine learning, neural networks*

*Nozdrevatykh Boris Fedorovich – engineer, Intelligent Radio Engineering Systems Design Bureau, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Lenin Ave., 40, 634050, e-mail: nbf152@yandex.ru.*

*Nozdrevatykh Daria Olegovna – engineer of SCB «Intelligent Radio Engineering Systems», Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Lenin Ave., 40, 634050, Tomsk, e-mail: nbf152@yandex.ru.*

*Kuprits Vladimir Yurievich – candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Radio Engineering Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Lenin Ave., 40, 634050, Tomsk, e-mail: vladimir.y.kuprits@tusur.ru.*

*Weber Vladislav Igorevich – engineer, Intelligent Radio Engineering Systems Design Bureau, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Lenin Ave., 40, 634050, Tomsk, Russia, e-mail: vladislav.i.veber@tusur.ru.*

**УДК 004.4**

**В.Ю. Куприц, Ю.А. Светличный, В.В. Дацюк, В.И. Вебер**

**СТРУКТУРА ПРОГРАММНО-АППАРАТНОЙ ПЛАТФОРМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ  
ПРОЕКТИРОВАНИЯ  
СИСТЕМ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА**

*Рассматривается один из вариантов структуры программно-аппаратного комплекса автоматизации проектирования систем на базе алгоритмов искусственного интеллекта.*

**Ключевые слова:** *программно-аппаратный комплекс, автоматизация проектирования систем, машинное обучение, нейронные сети*

В настоящее время растет количество публикаций по применению искусственного интеллекта в радиотехнических системах, размещаемых на борту беспилотных летательных аппаратов. Этому способствуют значительные успехи использования нейронных сетей в системах компьютерного зрения и обработки больших данных. Создание систем искусственного интеллекта требует совместную работу команды специалистов с системами обработки и хранения данных.

Для автоматизации процесса разработки новых решений и алгоритмов искусственного интеллекта рядом компаний разработано достаточно большое количество собственных программных платформ и облачных сервисов, позволяющих существенно облегчить процедуру создания и обучения нейронных сетей. Программные платформы искусственного интеллекта (ИИ) предлагают пользователям набор инструментов для создания интеллектуальных приложений. При помощи ИИ-платформ можно применять технологии машинного обучения для разработки систем машинного зрения, датчиков величин, обработки текстовых и звуковых материалов, различных массивов данных и т.д. Обычно требования к таким программным платформам заключаются в следующем:

– обеспечение возможности построения интеллектуальных приложений с поддержкой алгоритмов искусственного интеллекта;

- предоставление пользователям возможностей создания алгоритмов машинного обучения или готовых алгоритмов для создания приложений;

- предоставление разработчикам возможностей подключения к собственным алгоритмам источников данных для обеспечения машинного обучения и адаптации по производительности.

Приведём примеры широко известных российских и иностранных платформ [1–8].

Российские платформы: BAUMAI, ML Space, «Базис», Yandex DataSphere, SberCloud, AI Platform, DeepPavlov, CROC Cloud Services ML Platform, Intel AI DevCloud, OZON ML Platform, NNLab (Neural Networks and Deep Learning Lab), ODS (OpenDataScience), Big Data University, DataRoot Labs.

Иностранные платформы: Google Colab, Kaggle, Jupiter Notebook, Visual studio code, GDB Online, TensorFlow, PyTorch, Microsoft Azure, Amazon SageMaker, IBM Watson Studio, RapidMiner, KNIME, DataRobot, H2O.ai, Alteryx, Databricks, BigML, Dataiku, Orange, Weka, Matlab, SAS, TIBCO Spotfire.

Несмотря на значительное количество и широкие возможности существующих платформ искусственного интеллекта, при их практическом использовании возникает ряд принципиальных ограничений. В совокупности с прогрессивным ростом отраслевых узкоспециализированных решений имеются основания для разработки новой платформы, обеспечивающей:

- интуитивно понятный интерфейс, позволяющий платформе обеспечивать функции при минимально необходимом количестве пользовательских настроек, что возможно реализовать посредством инструментов создания модулей, ориентированных на узкое отраслевое применение (обработка радиосигналов, системы контроля технологических процессов на базе технического зрения и системы датчиков, системы безопасности на базе технического зрения и др.);

- создание базы данных обучающих выборок (датасетов), разделенных по областям применения и обеспечивающих более высокую точность синтезируемых алгоритмов при одновременном формировании правового поля в области интеллектуальной собственности как на синтезируемые алгоритмы, так и на обучающие выборки (электронная торговая площадка);

- возможность организации систем (в том числе автономно действующих) с повышенными требованиями по защите информации;

- возможность платформоориентированного синтеза моделей, прежде всего для встраиваемых систем с относительно невысокой производительностью.

Таким образом, актуальной задачей является разработка программно-аппаратной платформы автоматизации проектирования систем искусственного интеллекта на современных микрокомпьютерах с нейронными процессорами для эффективного решения различных задач на борту беспилотных летальных аппаратов в режиме реального времени.

Платформа автоматизации проектирования систем искусственного интеллекта – это программный комплекс, который объединяет в себе ряд функций, необходимых для эффективной совместной работы над созданием и обучением нейронных сетей (рисунок 1).

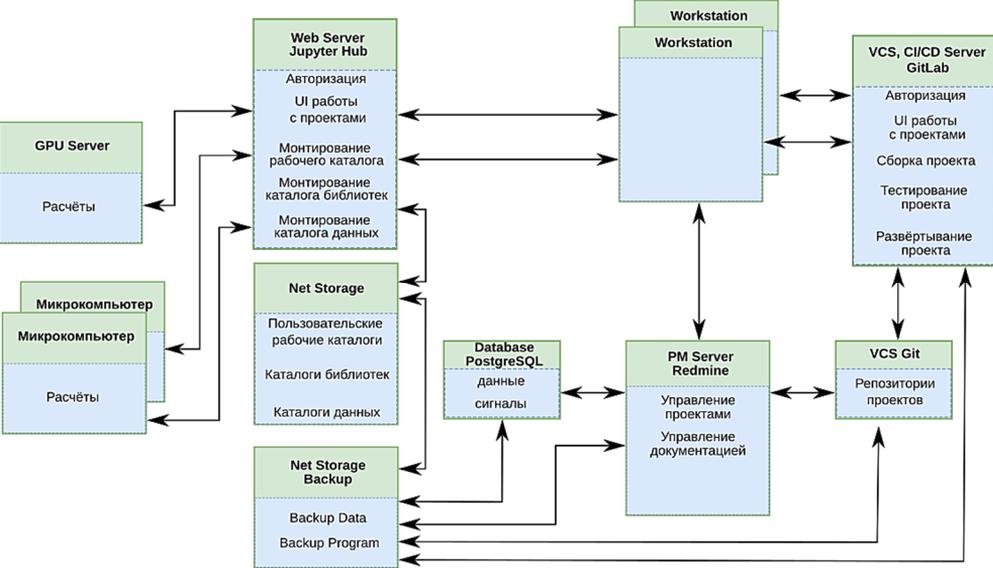


Рисунок 1 – Структура платформы автоматизации проектирования систем искусственного интеллекта

Перечислим эти функции.

1. Хранение данных, необходимых для обучения и работы нейронных сетей.
2. Контроль версий, позволяющий эффективно управлять и отслеживать изменения в создаваемых программах.
3. Удаленная работа и подключение к высокопроизводительному серверу для обучения сложных моделей нейронных сетей.
4. Планирование работы над проектами, распределение задач по созданию систем искусственного интеллекта.
5. Проектирование собственных структур нейронных сетей и других алгоритмов машинного обучения.
6. Формирование баз данных для обучения нейронных сетей.

7. Эффективное портирование программ нейронных сетей на микрокомпьютеры с нейронным процессором посредством системы инструментов и технологий.

Платформа включает в себя следующие блоки:

Workstation – рабочий компьютер сотрудника с доступом ко всем элементам системы через браузер в локальной сети;

PM Server Redmine – сервер управления рабочими проектами;

Database PostgreSQL – сервер для хранения метаданных;

Web Server Jupyter Hub – online IDE (Interactive Development Environment – интерактивная среда разработки);

Gpu server – сервер с графическими картами, предназначенный для глобальных расчетов;

микрокомпьютер – различные типы микрокомпьютеров с нейронным процессором, применяемых для решений практических задач на встраиваемых системах;

Net storage backup – дополнительный сервер для резервного копирования всех пользовательских и служебных данных;

Net storage – система хранения пользовательских данных и программ на сервере;

VCS Git – репозитории различных проектов на сервере;

VCS, CI/CD Server GitLab – GitLab предназначен для управления через веб-интерфейс версиями проекта, CI/CD Server предназначен для хранения, тестирования, сборки и развертывания последней актуальной версии проекта на сервере.

Сотрудники в платформе автоматизации проектирования систем искусственного интеллекта:

- 1) системный администратор;
- 2) ответственный исполнитель проектов;
- 3) менеджер проекта;
- 4) разработчик;
- 5) наблюдатель (сторонний человек от заказчика, который следит за состоянием проекта опционально).

В начале работы системный администратор устанавливает и настраивает программное обеспечение, создает новых пользователей в системе доступа операционной системы. Ответственный исполнитель проектов назначает и распределяет роли среди сотрудников, создает проекты в сервере Redmine.

Менеджер проекта делает запрос ответственному исполнителю проектов на сотрудников с требуемыми навыками, создает задачи проекта на сервере Redmine.

Разработчик за компьютером (Workstation) авторизуется и получает задания в Redmine. Получивший задание с сервера Redmine разработчик авторизуется в Jupyter Hub. Далее система монтирует каталоги

с программами, библиотеками и датасетами, которые доступны разработчику в IDE. Разработчик обновляет локальный репозиторий проекта, над которым он работает с сервера VCS Git. С помощью IDE на веб-сервере Jupyter Hub разработчик приступает к исполнению заданий. При необходимости он осуществляет вычисления на сервере GPU. После этого при необходимости приступает к тестированию разрабатываемого программного обеспечения на микрокомпьютере. Накопленные изменения в процессе выполнения заданий сохраняются в общем репозитории проекта. На сервере CI/CD по заранее написанным скриптам происходит сборка и тестирование проектов, после прохождения всех тестов выполняется развертывание актуальной версии проектов.

Периодически (один раз в сутки) автоматически выполняется резервное копирование всех пользовательских и служебных данных на отдельном сервере.

В заключение отметим, что выбирая одну из существующих на рынке программных платформ искусственного интеллекта, необходимо комплексно оценивать ее соответствие решаемым задачам по следующим характеристикам: стоимости приобретения и эксплуатации, возможностям решения отраслевой задачи синтеза алгоритма при минимальных временных затратах с максимальной эффективностью, адаптации синтезируемого алгоритма к целевой аппаратной платформе, степени информационной безопасности как непосредственно процесса разработки алгоритма, так и его последующего использования.

Представленная структура платформы автоматизации проектирования систем искусственного интеллекта является базовой и будет модернизироваться по мере выполнения проектов и получения обратной связи от потребителей.

### **Список использованной литературы**

1. Google Cloud Machine Learning. URL: <https://cloud.google.com/ml-engine/docs/tutorials/python-guide> (дата обращения: 25.06.2023).

2. Amazon Machine Learning. URL: <https://aws.amazon.com/machine-learning/> (дата обращения: 13.07.2023).

3. Microsoft Azure Machine Learning. URL: <https://azure.microsoft.com/en-us/services/machine-learning/> (дата обращения: 13.07.2023).

4. Обзор платформы Yandex Cloud. Официальная документация сервиса. URL: <https://cloud.yandex.ru/docs/overview/> (дата обращения: 14.07.2023).

5. Yandex DataSphere. Официальная документация сервиса. URL: <https://cloud.yandex.ru/docs/overview/> (дата обращения: 14.07.2023).

6. Концепции MLOps Platform от VK Cloud. Официальная документация сервиса VK Cloud. URL: <https://mcs.mail.ru/docs/ru/ml/mlplatform/concepts> (дата обращения: 14.07.2023).

7. ML Space. URL: <https://www.tadviser.ru/index.php/> (дата обращения: 17.05.2023).

8. BAUM AI. URL: <https://projects.2035.university/project/programmno-apparatnyj-kompleks-integracionnaa-platforma-ii-baum-ai> (дата обращения: 17.05.2023).

---

*Куприц Владимир Юрьевич – начальник СКБ «Интеллектуальные радиотехнические системы», канд. техн. наук, Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, e-mail: vladimir.y.kuprits@tusur.ru.*

*Светличный Юрий Алексеевич – ген. директор ООО «ЛЭМЗ-Т», канд. техн. наук, 634055, г. Томск, пр. Развития, 8, e-mail: svetlichny\_ya@lemz-t.ru.*

*Дацюк Валерий Валентинович – программист ООО «Элекард-Мед», 634055, г. Томск, пр. Развития, 3, e-mail: valeriy.datsyuk@yandex.ru.*

*Вебер Владислав Игоревич – инженер СКБ «Интеллектуальные радиотехнические системы», Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, e-mail: vladislav.i.veber@tusur.ru.*

#### **ANALYSIS OF METHODS FOR INCREASING THE SPEED OF NEURAL NETWORKS IN RADAR SYSTEMS**

*The article discusses methods for increasing the speed of data processing, in particular, data optimization on hardware is considered in detail.*

**Keywords:** *performance, neural networks, data types, processor architecture*

*Kuprits Vladimir Yurievich – Head of Intelligent Radio Engineering Systems Design Bureau, Candidate of Technical Sciences, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Lenin Ave., 40, 634050, e-mail: vladimir.y.kuprits@tusur.ru.*

*Svetlichny Yury Alekseevich – General Director of LLC «LEMZ-T», PhD in Technical Sciences, 634055, Tomsk, 8, Razvitiya Ave., e-mail: svetlichny\_ya@lemz-t.ru.*

*Datsyuk Valery Valentinovich – programmer, Elecard-Med LLC, 634055, Tomsk, 3, Razvitiya Ave., Tomsk, e-mail: valeriy.datsyuk@yandex.ru.*

*Weber Vladislav Igorevich – engineer of SKB «Intellectual radio-technical systems», Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Lenin Ave., 40, 634050, e-mail: vladislav.i.veber@tusur.ru.*

В.В. Усанов, А.С. Скитович, В.И. Вебер, В.Ю. Куприц

## СОЗДАНИЕ WEB-ИНТЕРФЕЙСА ДЛЯ ПЛАТФОРМЫ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

*Представлен макет разрабатываемого WEB-приложения, созданный на основе анализа существующих мировых аналогов.*

**Ключевые слова:** WEB-платформы, вывод в открытый доступ, WEB-верстка

В настоящее время в сфере проектирования радиолокационных систем одним из перспективных направлений развития является использование технологий, связанных с программированием.

Цель данной работы – создание WEB-приложения для комфортного взаимодействия с уже имеющимися модулями программ.

На первом этапе был проведен сравнительный анализ российских и иностранных платформ для поиска сходства и различий, чтобы использовать это при разработке. Существует множество российских и иностранных платформ с искусственным интеллектом, которые предоставляют различные возможности и функциональность для разработки и обучения моделей [1–4].

Одной из таких платформ является Google Colab. Она поддерживает язык программирования Python и библиотеки машинного обучения, такие как TensorFlow и PyTorch. Google Colab предоставляет возможность разработки и обучения моделей с использованием графических процессоров GPU. Кроме того, она интегрируется с другими инструментами и сервисами Google, такими как Google Drive и Google Sheets. Google Colab имеет активное сообщество пользователей, которые обмениваются знаниями и опытом на форумах и блогах.

Еще одной популярной платформой является Kaggle. Она поддерживает языки программирования Python и R, а также широкий спектр библиотек машинного обучения. Kaggle предоставляет доступ к графическим ускорителям (GPU и TPU) для обучения моделей. Она также интегрируется с другими инструментами и сервисами Kaggle, такими как KaggleDatasets и KaggleCompetitions. Kaggle также имеет активное сообщество пользователей, которые обмениваются знаниями и опытом на форумах и блогах.

Российские платформы предлагают услуги и ресурсы, специально адаптированные к российскому рынку и требованиям, что полезно для российских пользователей. Например, они могут иметь базы данных, обученные на российских данных, что необходимо для решения

специфических задач. Использование российских платформ предоставляет дополнительные гарантии безопасности данных, так как они соответствуют российским законодательным требованиям и стандартам безопасности. Также российские платформы предоставляют поддержку на русском языке, что удобно для пользователей, не владеющих иностранными языками.

ML Space – это российская платформа, которая поддерживает язык программирования Python и библиотеки машинного обучения, такие как TensorFlow и PyTorch. Она предоставляет инструменты для разработки и обучения моделей.

Yandex DataSphere – еще одна российская платформа, которая поддерживает язык программирования Python и библиотеки машинного обучения. Она предоставляет возможность разработки и обучения моделей на графических процессорах GPU. Yandex DataSphere интегрируется с другими инструментами и сервисами Yandex, такими как Yandex Cloud и Yandex Disk.

BAUMAI – российская платформа, которая поддерживает язык программирования Python и библиотеки машинного обучения. Она предоставляет инструменты для разработки и обучения моделей, поддерживает интеграцию с другими инструментами и сервисами, такими как базы данных и облачные хранилища.

У российских платформ по сравнению с иностранными есть ряд недостатков.

1. Ограниченный доступ к ресурсам.
2. Ограниченный выбор инструментов и библиотек.
3. Меньшее сообщество пользователей.
4. Ограниченная документация на русском языке.

Сравнительный анализ услуг, предоставляемых российскими и иностранными платформами, представлен в таблице 1.

Проведя сравнительный анализ, мы приступили к реализации своей WEB-платформы.

Неотъемлемой частью современных WEB-сервисов, использующих технологии машинного обучения, является модуль графического WEB-интерфейса, обеспечивающий эффективное и удобное взаимодействие между пользователями и программным комплексом. Пользовательский интерфейс представляет собой совокупность программных и аппаратных средств для взаимодействия пользователя с компьютером [5].



WEB-приложение – клиент-серверное приложение, в котором клиент взаимодействует с WEB-сервером при помощи браузера. Логика WEB-приложения распределена между сервером и клиентом. В этой структуре хранение данных осуществляется преимущественно на сервере и обмен информацией происходит по сети.

Современные графические интерфейсы для компьютеров сделаны по принципу WIMP (Windows, Icons, Menus, Pointers – окна, иконки, меню, указатели), который основан на взаимодействии пользователя с физическим устройством для управления положением курсора и показывает информацию в виде окон и иконок, а доступные команды размещаются в меню и могут быть использованы с помощью курсора устройства ввода.

В качестве среды разработки WEB-приложения использовался язык разметки HTML – стандартизированный язык разметки документов для просмотра WEB-страниц в браузере. Он позволяет создать структуру сайта, а именно кнопки, строки, вставки мультимедиа и т.д., разместить эти элементы на странице и привязать их к конкретным действиям пользователя.

Для улучшения дизайна сайта использовался CSS (Cascading Style Sheets) – каскадные таблицы стилей. Это формальный язык декорирования и описания внешнего вида документа (WEB-страницы), написанного с использованием языка разметки (чаще всего HTML или XHTML).

Главная страница WEB-платформы содержит несколько разделов:

- «Главная»;
- «Направления»;
- «Процессы»;
- «Контакты».

В разделе «Главная» (рисунок 1) представлены название приложения и его краткое описание, а также расположена кнопка для перехода в среду разработки.

В разделе «Направления» (рисунок 2) представлены преимущества WEB-приложения над другими подобными продуктами.

Раздел «Процесс» (рисунок 3) содержит краткую информацию о ходе разработки приложения.

В разделе «Контакты» (рисунок 4) содержится информация о разработчиках и их контакты (e-mail, Telegram).

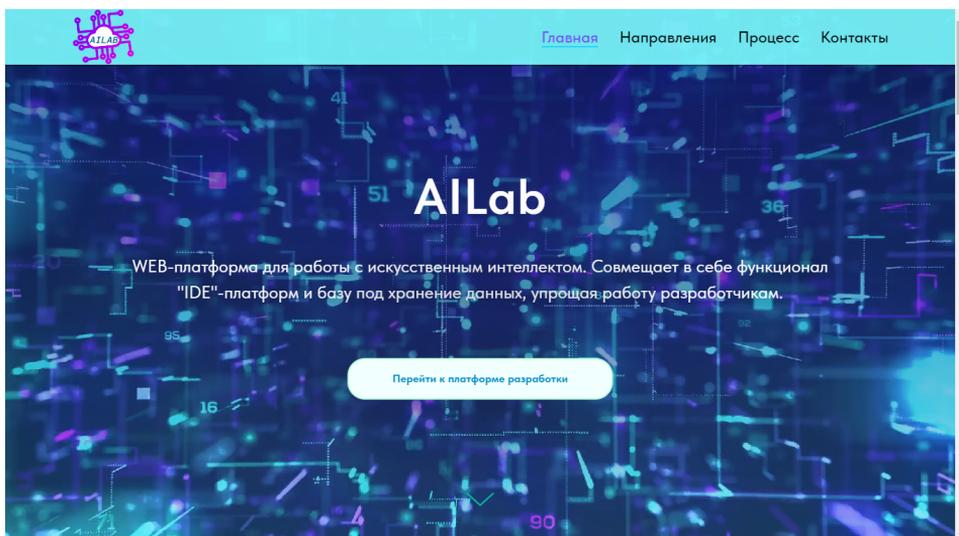


Рисунок 1 – Раздел приложения «Главная»



Рисунок 2 – Раздел приложения «Направления»

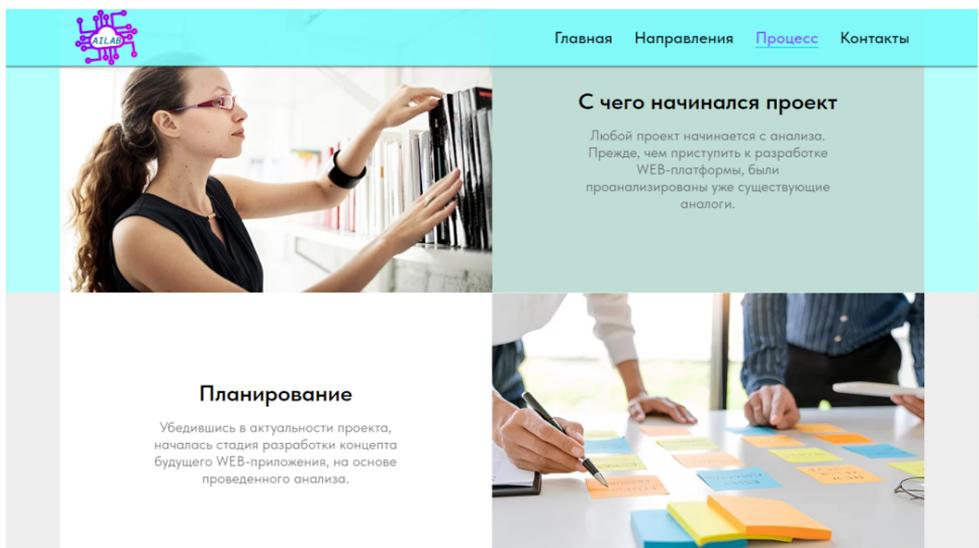


Рисунок 3 – Раздел приложения «Процесс»



Рисунок 4 – Раздел приложения «Контакты»

Основное окно входа представляет собой страницу с общей информацией о WEB-платформе. Сайт-карта – страница авторизации на платформе. Она является результатом первого этапа проекта. Данная работа помогла освоить первичные навыки создания WEB-сайтов, которые пригодятся для разработки IDE составляющей платформы.

## Список использованной литературы

1. WEB-приложение. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Веб-приложение>.
2. HTML. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/HTML>.
3. CSS. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/CSS>.
4. Keras Documentation. URL: <https://keras.io/>.
5. Доступ для просмотра примерного вида будущего WEB-приложения. URL: <http://uvvteknikit.tilda.ws/ailab#up>.

---

*Усанов Владислав Валерьевич – студент гр. 121-3, каф. радиотехнических систем, Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, e-mail: usanovvlad10@gmail.com.*

*Скитович Андрей Сергеевич – студент гр. 121-2, каф. радиотехнических систем, Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, e-mail: skitovitch.a@yandex.ru.*

*Вебер Владислав Игоревич – ассистент, каф. радиотехнических систем, Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, e-mail: vladislav.i.veber@tusur.ru.*

*Куприц Владимир Юрьевич – канд. техн. наук, доцент, каф. радиотехнических систем, Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, e-mail: vladimir.y.kuprits@tusur.ru.*

### CREATION OF A WEB-INTERFACE FOR AN ARTIFICIAL INTELLIGENCE PLATFORM

*A layout of the WEB-application being developed is presented, created based on an analysis of already existing worldwide analogues.*

**Keywords:** *WEB-platforms, open access, WEB-layout*

*Usanov Vladislav Valerievich – student 121-3 group department of radio engineering systems, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 634050, Tomsk, Lenin Ave., 40, e-mail: usanovvlad10@gmail.com.*

*Skitovich Andrey Sergeevich – student 121-2 group department of radio engineering systems, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 634050, Tomsk, Lenin Ave., 40, e-mail: skitovitch.a@yandex.ru.*

*Veber Vladislav Igorevich – assistant to the department of radio engineering systems, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 634050, Tomsk, Lenin Ave., 40, e-mail: vladislav.i.veber@tusur.ru.*

*Kuprits Vladimir Yurievich – candidate of technical sciences, associate professor, department of radio engineering systems, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 634050, Tomsk, Lenin Ave., 40, e-mail: vladimir.y.kuprits@tusur.ru.*

А.А. Нетесов, Ф.А. Эрин, В.И. Вебер, В.Ю. Куприц

## ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ С МИКРОКОМПЬЮТЕРАМИ НА БАЗЕ НЕЙРОННЫХ ПРОЦЕССОРОВ

*Рассматриваются отличительные особенности и возможности, предоставляемые микрокомпьютерами на базе нейронных процессоров, архитектура таких микрокомпьютеров, а также уникальные преимущества использования NPU для решения задач системами с искусственным интеллектом.*

**Ключевые слова:** микрокомпьютер, нейронный процессор, искусственный интеллект

**Введение.** С появлением микрокомпьютеров (МК) на базе нейронных процессоров сфера вычислений претерпела революционные изменения. По мере роста спроса на приложения с искусственным интеллектом (ИИ) и потребности в пограничных вычислениях микрокомпьютеры на базе нейронных процессоров стали мощными средствами для обработки в устройствах ИИ. Благодаря интеграции специализированного оборудования, известного как блоки нейронной обработки (NPU), эти микрокомпьютеры предоставляют беспрецедентные возможности для ускорения вычислений ИИ и раскрытия потенциала ИИ на границе сетей.

**Микрокомпьютеры на базе NPU.** Микрокомпьютеры на базе NPU, также известные как устройства Edge AI, представляют собой малогабаритные вычислительные устройства, которые специально разработаны для внедрения искусственного интеллекта в периферийные устройства. Это означает, что вычисления в области искусственного интеллекта могут выполняться локально на самом устройстве, т.е. без использования облачных вычислений. Эффективная модель Edge AI включает оптимизированную инфраструктуру вычислений, которая может обрабатывать объемные рабочие нагрузки ИИ на периферии.

Преимущество микрокомпьютеров на базе NPU состоит в том, что они могут эффективно и в режиме реального времени обрабатывать задачи искусственного интеллекта даже в условиях ограниченных мощностей и вычислительных ресурсов. Благодаря локальной обработке задач ИИ они избавляют от необходимости постоянно подключаться к Интернету и уменьшают задержки, что делает их подходящими для приложений, где важна немедленная реакция ИИ, а также в тех случаях, когда речь идет о конфиденциальности и безопасности данных.

Такие микрокомпьютеры обеспечивают гибкость при разработке приложений для задач ИИ. Программирование микроконтроллера возможно с использованием различных языков и фреймворков, алгоритмы адаптируются к конкретным требованиям, что позволяет оптимизировать модель обнаружения и применять ее с другими функциональными возможностями микрокомпьютера.

Микрокомпьютеры с NPU поддерживают специальные фреймворки и библиотеки ИИ. Такие популярные фреймворки, как TensorFlow, PyTorch или ONNX, обычно оптимизированы для эффективной работы с аппаратным обеспечением NPU, что облегчает разработчикам развертывание моделей ИИ на устройстве.

**Нейронные процессоры.** Нейронный процессор (Neural Processing Unit) – это специализированный аппаратный компонент, предназначенный для ускорения вычислений посредством искусственных нейронных сетей, особенно в контексте задач машинного обучения. NPU отлично справляются с выполнением матричных операций и вычислений, необходимых для обучения и работы нейронных сетей.

Некоторые NPU разработаны специально, чтобы делать выводы. Это позволяет использовать предварительно обученные нейронные сети для прогнозов или принятия решений на основе новых поступающих данных.

**Преимущества NPU при решении задач ИИ.** Нейронные сети в значительной степени опираются на матричные операции, такие как умножение и свертка матриц. Эти операции связаны с крупномасштабными математическими вычислениями, которые требуют больших вычислительных затрат. NPU оснащены специализированным аппаратным обеспечением, включая блоки умножения-накопления (MAC), что позволяет выполнять матричные операции гораздо быстрее, чем на CPU или GPU.

Многие NPU содержат несколько вычислительных ядер или аппаратных ускорителей, которые могут выполнять вычисления параллельно. Такая возможность повышает скорость работы нейронных сетей и позволяет работать со сложными моделями с высокоразмерными данными.

NPU имеют архитектуру памяти, оптимизированную для работы с ИИ. Эффективный доступ к памяти сводит к минимуму перемещение данных между ее различными компонентами, уменьшая задержки и повышая общую производительность. Кроме того, для оптимизации использования памяти в NPU могут применяться методы сжатия весов. Эти методы позволяют сократить объем памяти для хранения параметров нейронной сети, сохраняя при этом приемлемый уровень точности.

NPU часто адаптированы к распространенным архитектурам моделей ИИ, таким как сверточные нейронные сети (CNN) для обработки изображений или рекуррентные нейронные сети (RNN) для обработки

последовательных данных. Это повышает производительность и эффективность NPU при решении задач ИИ.

**Архитектура микрокомпьютеров на базе NPU.** Основным компонентом микрокомпьютера NPU является блок нейронной обработки. Именно он отвечает за выполнение основной части задач ИИ в устройстве.

В состав NPU могут входить специализированные аппаратные блоки, такие как тензорные ядра или блоки умножения-аккумуляции, оптимизированные для выполнения матричных операций и численных расчетов. Эти блоки значительно ускоряют нейросетевые вычисления.

Помимо блока нейронной обработки, в состав микрокомпьютеров на базе NPU входит центральный процессор CPU (Central Processing Unit) общего назначения и иногда GPU (Graphics Processing Unit). CPU решает общие вычислительные задачи и управляет устройством, а GPU может использоваться для рендеринга графики и в некоторых случаях для поддержки дополнительных вычислений.

Микрокомпьютеры на базе NPU оснащаются различными типами памяти, такими как оперативная память и кэш-память на кристалле, играющая роль буфера между оперативной памятью и процессором. Постоянная память используется для хранения модели нейронной сети, промежуточных вычислений, обновления моделей с помощью новых данных и эффективного управления версиями моделей.

**Особенности работы с NPU.** Работа с микрокомпьютерами на базе NPU имеет ряд особенностей, обусловленных специализированным характером этих устройств и их ориентированностью на решение задач ИИ.

Несмотря на то что они отлично справляются с вычислениями в области ИИ, они могут быть не столь эффективны в решении задач общего назначения по сравнению с традиционными CPU или GPU.

Прежде чем приступить к работе с микрокомпьютерами на базе NPU, необходимо убедиться, что модели ИИ совместимы с архитектурой конкретного NPU и поддерживаемыми фреймворками. Различные NPU могут иметь оптимизированную поддержку определенных фреймворков, поэтому может потребоваться адаптация моделей для конкретной платформы. Производители часто поставляют оптимизированные фреймворки для своих NPU, позволяющие полностью использовать потенциал аппаратного обеспечения.

**Особенности предварительной и постобработки данных.** Важную роль играет правильная предварительная и постобработка данных. Она необходима для обеспечения соответствия форматов входных и выходных данных требованиям NPU.

Предварительная обработка включает в себя преобразование исходных данных в подходящий формат, который может быть использован в нейронной сети. Основные цели предварительной обработки – сделать

данные более управляемыми, улучшить сходимость в процессе обучения и повысить обобщающие способности сети.

Одним из распространенных этапов предварительной обработки является нормализация данных. Нормализация помогает предотвратить доминирование некоторых признаков в процессе обучения из-за их больших значений, что приводит к сбалансированному процессу обучения.

Другим немаловажным этапом обработки является дополнение данных – метод искусственного расширения обучающего набора данных путем преобразований имеющихся данных. Эти преобразования могут включать в себя повороты, переворачивания, масштабирование и другие геометрические изменения. Увеличение объема данных позволяет повысить устойчивость модели за счет того, что она подвергается более широкому спектру вариаций.

Постобработка происходит после того, как нейронная сеть сделала прогноз или приняла решение на основе входных данных. Основная цель постобработки – интерпретация выходных данных модели и преобразование их в осмысленный формат для дальнейшего анализа или принятия решений.

В задачах классификации нейронная сеть часто выдает вероятностную оценку. Для получения окончательного прогноза применяется пороговое значение, преобразующее вероятности в метки классов. Для некоторых приложений метки классов, предсказанные моделью, могут быть преобразованы в исходные категориальные или текстовые представления для лучшей интерпретации.

**Особенности работы с микрокомпьютером ASUS Tinker Edge R.** ASUS Tinker Edge R (рисунок 1) построен на базе SoC Rockchip RK3399Pro, который содержит двухъядерный процессор ARM Cortex-A72 и четырехъядерный процессор ARM Cortex-A53, обеспечивая в общей сложности шесть процессорных ядер. Кроме того, в SoC интегрирован мощный графический процессор ARM Mali-T860MP4 для обработки графики и ускорения искусственного интеллекта. Отличительной особенностью Tinker Edge R является встроенный процессор NPU Rockchip, предназначенный для ускорения вычислений, связанных с задачами ИИ.

Микрокомпьютер оснащен рядом портов ввода/вывода, включая порты USB 3.2 Gen1 Type-A и Type-C, выход HDMI, 3,5-мм аудиоразъем и контакты GPIO (General Purpose Input/Output). Эти порты обеспечивают универсальность подключения периферийных устройств и взаимодействия с другими устройствами. Также Tinker Edge R предлагает различные варианты подключения, в том числе Gigabit Ethernet, Wi-Fi 5 (802.11ac) и Bluetooth 5.0.



Рисунок 1 – ASUS Tinker Edge R

Tinker Edge R имеет 4 Гбайт памяти LPDDR4, что обеспечивает достаточный объем для задач ИИ и вычислений общего назначения. Кроме того, в устройстве предусмотрен слот для карт памяти microSD с возможностью расширения, что позволяет увеличить объем памяти для хранения моделей и данных ИИ.

Tinker Edge R совместим с различными операционными системами, включая дистрибутивы на базе Linux, такие как Debian и Ubuntu [1].

Чтобы начать работу с микрокомпьютером, необходимо подключить периферийные устройства через соответствующие каналы связи. Затем нужно установить драйверы с официального сайта ASUS, а после подготовить рабочую среду: установить программное обеспечение, включая фреймворк искусственного интеллекта (например, TensorFlow) и все необходимые библиотеки для вывода модели.

Далее нужно перенести файл модели ИИ на Tinker Edge R. Для передачи файлов можно использовать различные способы, например USB-накопитель.

После успешного переноса модели производится запуск фреймворка и его инициализация с помощью конфигураций и параметров модели [2].

Так, например, после установки сверточной нейронной сети на микрокомпьютер проводилось тестирование быстродействия нейронных сетей. Замерялась скорость обработки одного кадра изображения с размером  $32 \times 32 \times 3$ .

На CPU программа справилась за 902546 мкс, показав производительность обработки около 1,10 FPS.

На NPU программа справилась за 24557 мкс, показав производительность обработки около 40 FPS.

**Выводы.** В заключение можно отметить, что использование микрокомпьютеров на нейронных процессорах имеет значительные преимущества по сравнению с МК на центральных процессорах. Нейронные процессоры способны обрабатывать большие объемы данных

параллельно, что позволяет значительно повысить скорость и эффективность работы.

Однако необходимо учитывать, что использование нейронных процессоров сопряжено с некоторыми ограничениями. Во-первых, требуется создание нейронных сетей на основе библиотек Python определенной версии, что ограничивает выбор инструментов и технологий, или может возникнуть проблема совместимости нейронного процессора и нейронной сети. Во-вторых, встраиваемые системы, включающие в себя нейронные процессоры, обычно обладают небольшим объемом памяти, что может ограничить возможности обработки данных. Также нейронные процессоры эффективны только при обработке данных с помощью нейронных сетей, для обучения которых следует использовать компьютеры с высокопроизводительными видеокартами.

Несмотря на эти ограничения, преимущества микрокомпьютеров на базе нейронных процессоров значительны и они могут быть полезными при решении различных задач, таких как компьютерное зрение, обработка и анализ данных на встраиваемых системах.

### Список использованной литературы

1. Tinker Edge R Specifications. URL: <https://tinker-board.asus.com/product/tinker-edge-r.html>.

2. Tinker Edge R Documentation. URL: [https://tinker-board.asus.com/doc\\_er.html#started](https://tinker-board.asus.com/doc_er.html#started).

---

*Нетесов Александр Алексеевич – студент гр. 120-1, каф. радиотехнических систем, Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, e-mail: alexandrnetesov02@mail.ru.*

*Эрин Федор Анатольевич – студент гр. 740-1, каф. безопасности информационных систем, Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, e-mail: rodion.levorsky@yandex.ru.*

*Вебер Владислав Игоревич – ассистент, каф. радиотехнических систем, Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, e-mail: vladislav.i.veber@tusur.ru.*

*Куприц Владимир Юрьевич – канд. техн. наук, доцент, каф. радиотехнических систем, Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, e-mail: vladimir.y.kuprits@tusur.ru.*

## FEATURES OF WORK WITH MICROCOMPUTERS BASED ON NEURAL PROCESSORS

*The paper discusses the distinctive features and capabilities provided by microcomputers based on neural processors, the architectural features of such microcomputers, and the unique advantages of using NPUs to solve AI problems.*

**Keywords:** *microcomputer, neural processor, artificial intelligence*

*Netesov Alexander Alekseevich – student gr.120-1of the Department of Radio Engineering Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 634050, Tomsk, Lenin Ave., 40, e-mail: alexandrnetesov02@mail.ru.*

*Erin Fedor Anatolevich – student of group 740-1 of the Department of security of information systems, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 634050, Tomsk, Lenin Ave., 40, e-mail: rodion.levorsky@yandex.ru.*

*Weber Vladislav Igorevich – Assistant of the Department of Radio Engineering Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 634050, Tomsk, Lenin Ave., 40, e-mail: vladislav.i.veber@tusur.ru.*

*Kuprits Vladimir Yurievich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Radio Engineering Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 634050, Tomsk, Lenin Ave., 40, e-mail: vladimir.y.kuprits@tusur.ru.*

**УДК 615.84**

**В.А. Бахтина**

### НЕЙРОСЕТЕВАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЯ МЫШЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОМИОГРАФИИ

*Описывается конструкция измерителя мышечной активности на базе электромиографического датчика, предназначенного для регистрации биоэлектрических потенциалов трицепса, отвечающих за сгибание/разгибание руки в локтевом суставе. Оценена возможность применения нейросетевой обработки данных электромиографии для получения адекватной картины исследования.*

**Ключевые слова:** *мышечная активность, электромиография, нейросеть, биоэлектрический потенциал*

**Введение.** Определение мышечной активности конечностей может быть полезным в различных областях, таких как занятия спортом, реабилитация после перенесенных заболеваний или контроль состояния здоровья космонавтов, находящихся в невесомости. Нарушения деятельности опорно-двигательного аппарата диагностируют при помощи различных методик, например электро- и механомиографией (ЭМГ/ММГ) [1–4]. ЭМГ является самым распространенным способом регистрации биоэлектрических потенциалов мышц опорно-двигательного аппарата. Такой способ регистрации сигналов очень удобен и прост, но подвержен влиянию большого количества сторонних шумов, таких как шумы электронного оборудования, окружающей среды, собственные шумы мышц, находящихся вблизи электродов, и т.д. [5]. Фильтрацию сигнала можно проводить при помощи нейросетевой обработки данных [6, 7].

В данной работе представлен измеритель мышечной активности верхней конечности, выполненный на основе ЭМГ-датчика, проведен анализ возможности применения нейросетевой обработки данных для получения адекватной картины исследования.

**Практическая часть.** ЭМГ основана на определении биоэлектрических потенциалов мышц, возникающих в живых клетках и тканях. Биоэлектрические потенциалы различных частей человеческого тела имеют различные диапазоны значений. Параметры сигналов мышечных тканей верхней конечности, фиксируемые электромиографом, составляют:

- амплитуда 100–10000 мкВ;
- частота 5–5000 Гц.

Эти значения малы, следовательно, необходимо использовать высокоточное оборудование и соответствующие методы для обнаружения и обработки биологических сигналов.

Разрабатываемый измеритель предназначен для оценки мышечного состояния конечности при сгибе в локтевом суставе и содержит: 1) ортез для размещения комплектующих; 2) датчик измерения угла сгиба конечности; 3) микроконтроллер для обработки данных; 4) ЭМГ-датчик; 5) элемент питания; 6) модуль передачи данных на внешний носитель.

Структура макета изображена на рисунке 1.

Измеритель функционирует следующим образом. Потенциометрический датчик СПЗ-4АМ, установленный на ортезе, фиксирует значения угла сгиба конечности в локтевом суставе, информация с датчика обрабатывается при помощи микроконтроллера ATmega328, установленного на плате Arduino Uno, ЭМГ-модуль типа Elemyo MYO v1.3 считывает величину биопотенциалов мышц. Для передачи данных на внешний носитель измеритель оснащен модулем sd-карты на 2 Гбайт. Такой способ хранения информации не позволяет отслеживать данные

в реальном времени, но не требует постоянного присутствия испытуемого рядом с ПК, а также снижает возможные помехи для ЭМГ-модуля. Разрабатываемый измеритель помещен в специально изготовленный корпус с размерами 130×55×30 мм.

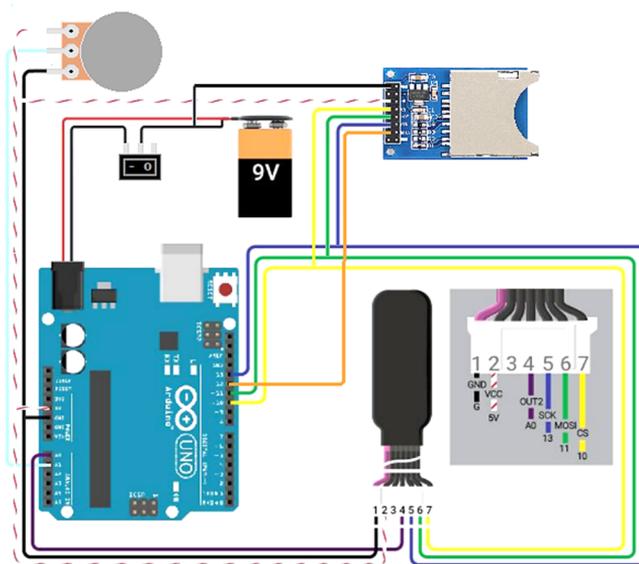


Рисунок 1 – Структура разрабатываемого макета измерителя мышечной активности

Основной мышцей, отвечающей за сгибание/разгибание руки, является трицепс, поэтому ЭМГ-модуль крепится непосредственно к нему.

Вся система питается от одной батареи напряжением 9 В. Устройство крепится на верхней части ортеза при помощи специальных удерживающих ремней. Крепление макета к руке и внешний вид ЭМГ-модуля представлены на рисунке 2.



*a*



*б*

Рисунок 2 – Крепление макета к руке (*a*); внешний вид ЭМГ-модуля (*б*)

На рисунке 3 приведены данные, полученные в результате апробации работы изготовленного макета. Синим цветом показаны данные электрического потенциала трицепса, полученные с ЭМГ-модуля. Датчик обладает встроенным усилителем, поэтому разность потенциалов полученного сигнала в разы превышает реальную величину мышечного потенциала трицепса.

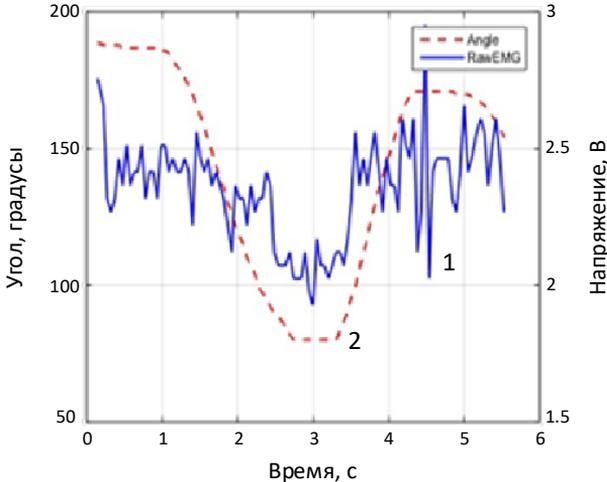


Рисунок 3 – Полученные сигналы от ЭМГ-модуля (1) и потенциометра (2)

Из рисунка можно сделать вывод, что данные мышечной активности соответствуют по форме изменению угла сгиба конечности, фиксируемому потенциометром, но несмотря на имеющуюся у ЭМГ-модуля систему фильтрации имеют слишком много искажений. Для обработки сигнала предлагается использовать метод на основе искусственных нейронных сетей. Нейронные сети – это нелинейные системы, позволяющие повысить точность метода измерения, не снижая его эффективность.

Реализуемая схема проведения наблюдений показана на рисунке 4.

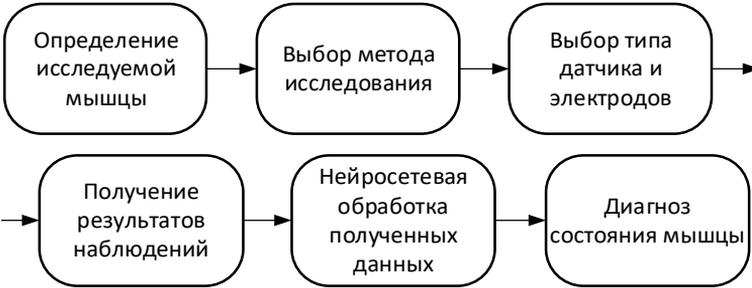


Рисунок 4 – Схема проведения наблюдений

Для решения поставленных задач можно использовать одну из распространенных нейронных сетей – многослойный персептрон (сеть прямой связи). Архитектура выбранной нейронной сети содержит набор входных, выходных и скрытых слоев. Каждый входной узел связан с узлом скрытого слоя. Связь между узлами называется весом. Каждый узел скрытого слоя аналогичным образом связан с узлами следующего скрытого/выходного слоя. Для обучения нейросети выбран метод обратного распространения ошибки.

Результатом нейросетевой обработки будет фильтрация ЭМГ-сигнала, что позволит упростить конфигурацию измерителя мышечной активности путем исключения потенциометрического датчика с низкой износостойкостью.

**Заключение.** Разработанный измеритель мышечной активности может использоваться для анализа и коррекции мышечной активности руки в качестве одной из подсистем различных комплексов. Применение нейросетевой обработки данных ЭМГ-модуля способно повысить точность метода оценки мышечной активности, а также упростить конструкцию разработанного измерителя.

*Исследование выполнено в рамках государственного задания ФГАОУ ВО Сибирский федеральный университет (номер FSRZ-2023-0008)*

### Список использованной литературы

1. Howard Ryisnn M., Conway Richard, Harrison Andrew J. Muscle Activity in Sprinting: A Review // Journal Sports Biomechanics. 2017. DOI:10.1080/14763141.2016.1252790.
2. Space travel directly induces skeletal muscle atrophy / H. Vandenberg, J. Chromiak, J. Shansky [et al.] // FASEB J Doubly Fed Am Soc Exp Biol. 1999. V. 13. P. 1031-8.
3. Steele Katherine M., Papazian Christina, Feldner Heather A. Muscle Activity After Stroke: Perspectives on Deploying Surface Electromyography in Acute Care // Frontiers in Neurology. 2020. V. 11. DOI:10.3389/fneur.2020.576757.
4. Woodward R.B., Shefelbine S.J., Vaidyanathan R. Pervasive Monitoring of Motion and Muscle Activation: Inertial and Mechanomyography Fusion // IEEE/ASME Trans. Mechatronics. 2017. V. 22. P. 2022–2033.
5. Amrutha N., Arul V.H. A Review on Noises in EMG Signal and its Removal // International Journal of Scientific and Research Publications. 2017. V. 7, Issue 5. ISSN 2250–3153.
6. Абдуллаев Н.Т., Исмаилова К.Ш. Применение нейронных сетей для распознавания патологических изменений в стимуляционной электромиограмме // Медицинская техника. 2011. № 6 (270).

7. Rezwanul Ahsan, Muhammad Ibrahimy, Othman Omran Khalifa. The Use of Artificial Neural Network in the Classification of EMG Signals // Conference: Proceedings – 2012 3rd FTRA International Conference on Mobile, Ubiquitous, and Intelligent Computing, MUSIC. 2012. DOI:10.1109/MUSIC.2012.46.

---

*Бахтина Валентина Анатольевна – ст. преподаватель, каф. приборостроения и наноэлектроники, Институт инженерной физики и радиоэлектроники, Сибирский федеральный ун-т, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79, e-mail: sl\_507@mail.ru.*

#### **MUSCLE ACTIVITY METER FOR SYSTEMS OF ANALYSIS AND CORRECTION OF MOTOR ACTIVITY OF THE HAND**

*The paper describes the design of a muscle activity meter based on an electromyographic sensor designed to register the bioelectric potentials of the triceps responsible for flexion /extension of the arm in the elbow joint. The possibility of using neuronet processing of electromyography data to obtain an adequate picture of the study is evaluated.*

**Keywords:** *muscle activity, electromyography, neural network, bioelectric potential*

*Bakhtina Valentina Anatolyevna – senior lecturer, Department of Instrumentation and Nanoelectronics, Institute of Engineering Physics and Radioelectronics, Siberian Federal University, 660041, Krasnoyarsk, Svobodny Ave., 79, e-mail: sl\_507@mail.ru.*

**УДК 004.414.28**

**Е.А. Чирьев, А.И. Немчинов, Р.А. Гнеушев**

#### **СРАВНЕНИЕ РАЗРАБОТКИ ЧАТ-БОТОВ В РАЗЛИЧНЫХ МЕССЕНДЖЕРАХ**

*Представлен сравнительный анализ платформ для разработки чат-ботов в различных мессенджерах. Проведено исследование четырех мессенджеров: Telegram, Viber, WhatsApp и ВКонтакте. Показаны преимущества и недостатки каждого мессенджера, а также эффективность в контексте разработки чат-ботов. Результаты исследования могут быть полезны как для разработчиков, так и для исследователей, занимающихся технологиями машинного обучения и обработки естественного языка.*

**Ключевые слова:** *чат-боты, мессенджеры*

В настоящее время существует огромное количество мессенджеров, поддерживающих возможность создания чат-ботов. Среди самых популярных – Telegram, Viber, WhatsApp и ВКонтакте. Рассмотрим особенности разработки ботов посредством каждой из этих платформ [1–7].

### **Telegram**

Telegram является одним из самых простых и удобных мессенджеров для создания чат-ботов. Платформа поддерживает создание ботов на множестве языков программирования, включая C#, Java, PHP, Python и другие. Процесс разработки бота в Telegram состоит из нескольких этапов.

1. Регистрация бота в BotFather – чат-боте Telegram, отвечающем за регистрацию других ботов. На этом этапе нужно придумать имя бота и короткое описание, которые будут использоваться в дальнейшем. После регистрации BotFather предоставляет Token доступа к API для разработки бота.

2. Написание кода бота для обработки входящих сообщений от пользователей и отправки ответных сообщений. Для этого можно использовать библиотеки Telegram Bot API, доступные для большинства языков программирования. Бот должен реагировать на текстовые сообщения, команды, изображения, голосовые сообщения и другой контент от пользователей.

3. Размещение бота на сервере. Бот должен постоянно работать, чтобы принимать входящие сообщения от пользователей и отправлять им ответы. Для хостинга бота можно использовать собственный сервер или облачные сервисы, такие как Heroku, AWS и Google Cloud.

4. Добавление бота в чаты и группы Telegram для тестирования и использования. С помощью @BotFather можно получить ссылку для добавления бота в чат.

5. Продвижение бота в Telegram. Для увеличения популярности бота можно использовать каналы и чаты, рассказывать о боте в своих сообществах, добавлять его в каталоги ботов и пр.

### **Viber**

Viber поддерживает создание ботов на множестве популярных языков программирования. Процесс разработки бота включает в себя несколько этапов. Сначала необходимо зарегистрировать приложение в Viber Developer Dashboard и получить ключ доступа к API. Затем разработчику предстоит написать код бота, чтобы обеспечить обработку сообщений от пользователей и отправку ответов. После написания кода бот должен быть размещен на сервере, чтобы он мог функционировать. И наконец, бот должен быть добавлен в чаты пользователей для тестирования и отладки. Viber позволяет создавать многофункциональные боты, способные реагировать на различные типы сообщений, включая

текст, изображения, видео, голосовые сообщения, кнопки и другой контент. Боты Viber могут не только отвечать на сообщения пользователей, но и сами инициировать диалог, задавать вопросы и предлагать опции для выбора. Благодаря гибким настройкам, боты Viber могут использоваться для самых разных задач, таких как онлайн-консультирование, рассылка уведомлений, проведение опросов и многое другое.

### **WhatsApp**

WhatsApp также пользуется огромной популярностью среди пользователей, однако эта платформа пока не предоставляет открытых API для разработки чат-ботов. Боты WhatsApp могут быть созданы только с использованием неофициальных API и методов взлома сервиса, что нарушает условия использования WhatsApp. Официально WhatsApp в настоящее время не поддерживает и не разрешает создание ботов или каких-либо автоматизированных систем взаимодействия с пользователями в своем приложении. Хотя многие разработчики и компании с удовольствием воспользовались бы возможностью создавать их, учитывая большую аудиторию пользователей этого мессенджера. Возможно, в будущем ситуация изменится и WhatsApp откроет свою платформу для разработчиков чат-ботов.

### **ВКонтакте**

ВКонтакте поддерживает создание официальных ботов, однако доступ к API предоставляется не для всех разработчиков. Для получения доступа к API ВКонтакте необходимо подать заявку. Если заявка будет одобрена, можно приступить к разработке бота: регистрации приложения, получению Token доступа, написанию кода бота, его размещению и добавлению в чаты. Боты ВКонтакте могут обрабатывать и генерировать ответы на разнообразные типы сообщений от пользователей – текст, изображения, аудио, видео, кнопки и другие.

В таблице 1 для сравнения представлена информация о рассмотренных мессенджерах.

Однозначно утверждать, что Telegram и Viber лучшие платформы для разработки чат-ботов, можно по нескольким причинам. Во-первых, API этих мессенджеров предельно просты и понятны для освоения, что делает процесс создания чат-бота доступным даже для начинающих программистов. Во-вторых, Telegram и Viber не накладывают серьезных ограничений на функционал ботов и предоставляют им широкие возможности взаимодействия с пользователями. Наконец, процедура размещения ботов в этих мессенджерах и их подключения к чатам является максимально упрощенной и не требует специальных технических навыков.

Таблица 1 – Сравнение мессенджеров

Мессенджер	Сложность разработки	Языки программирования	Возможности
Telegram	Простая	C#, Java, PHP, Python и другие	Реагирует на текст, изображения, голосовые сообщения и др. Простое продвижение
Viber	Средняя	Популярные языки	Реагирует на различные типы контента. Может инициировать диалог и задавать вопросы. Используется для консультирования, рассылок и опросов
WhatsApp	Сложная	Ограниченный набор языков	Ограниченные возможности ботов. Используется в основном для клиентской поддержки и информирования о событиях
ВКонтакте	Средняя	Python, JavaScript, PHP, Ruby и другие	Чат-боты могут принимать оплату от клиентов прямо в окне переписки. Геймификация

Несмотря на трудности с отсутствием открытых API и ограничениями для ботов, их разработка в WhatsApp и ВКонтакте представляется перспективной. Хотя WhatsApp и ВКонтакте пока ограничивают функционал ботов и усложняют их размещение в будущем, возможно, что эти платформы предоставят API и позволят создание ботов. Поэтому, несмотря на текущие сложности, разработка ботов в WhatsApp и ВКонтакте перспективна.

### Список использованной литературы

1. Shevat Amir. Designing Bots: Creating Conversational Experiences; издательство O'Reilly Media, Inc; 2017. 150 p.
2. Кравец М.Б. Использование чат-ботов для автоматизации информационных процессов. В 2 т. // 80-я Межвузовская студенческая науч.-практ. конф. : тез. докл. / под ред. А.З. Ткаченко. Хабаровск, 2022. Т. 2. С. 89.
3. Дмитриев А.С. Алгоритмы работы чат-бота для поиска товаров // Инженерный вестник Дона. 2021. № 4 (76). С. 135–147.
4. Аббасова Т.С., Польшин С.Н. Чат-боты и нейронные сети // Эволюционные процессы информационных технологий : сб. тр. по материалам 2-й межвузовской науч.-техн. конф. с междунар. участием / под науч. ред. В.М. Артюшенко. 2017. С. 115–122.

5. Талачев И.Е. Применение машинного обучения в задаче классификации с использованием языка PYTHON // Информатика и вычислительная техника : сб. ст. конф. 2019. С. 30–36.

6. Березин С.А., Мигутский А.В. Исследование алгоритмов машинного обучения для классификации индентов (пользовательских намерений) в условиях обучающих выборок малого объема // Информационные технологии : материалы 57-й Междунар. науч. студенческой конф. 2019. С. 116.

7. Аверьянов С.Н. Выбор инструмента для разработки чат-бота // Студенческий вестник. 2021. № 19-7 (164). С. 88–91.

---

*Чирьев Егор Андреевич – студент, каф. автоматической обработки информации, Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, e-mail: chirjeveg@gmail.com.*

*Немчинов Алексей Игоревич – студент, каф. автоматической обработки информации, Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, e-mail: alexej.nemchinov@yandex.ru.*

*Гнеушев Родион Александрович – студент, каф. автоматической обработки информации, Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, e-mail: rodney226@gmail.com.*

#### **COMPARISON OF CHATBOT DEVELOPMENT IN DIFFERENT MESSENGERS**

*This article provides a comparative analysis of platforms for developing chatbots in different messengers. A study of four messengers such as Telegram, Viber, WhatsApp and VKontakte was conducted. The advantages and disadvantages of each messenger are analyzed, and their effectiveness in the context of chatbot development is compared. The results of the study can be useful both for developers and researchers involved in machine learning and natural language processing technologies.*

**Keywords:** chatbots, messengers

*Chiriev Egor Andreyevich – student, Department of automatic information processing, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Lenin Ave., 40, 634050, e-mail: chirjeveg@gmail.com.*

*Nemchinov Alexey Igorevich – student, Department of Automatic Information Processing, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 634050, Tomsk, Lenin Ave., 40, e-mail: alexej.nemchinov@yandex.ru.*

*Gneushev Rodion Alexandrovich – student, Department of automatic information processing, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 634050, Tomsk, Lenin Ave., 40, e-mail: rodney226@gmail.com.*

А.К. Алымкулова, Ю.О. Лобода, Н.С. Бирюкова

**РАЗРАБОТКА ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ  
«ИЗМЕРЕНИЕ УРОВНЯ СТРЕССА  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОИНТЕРФЕЙСА»**

*Предлагается вариант лабораторной работы для студентов высших учебных заведений, изучающих нейротехнологии.*

**Ключевые слова:** эксперимент, нейротехнологии, лабораторная работа, нейроинтерфейс

Нейротехнологии являются относительно недавно возникшей наукой. Эта область насчитывает полвека, но своей зрелости достигла только в последние двадцать лет. Нейротехнологии оказали существенное влияние на общество, начиная от синтеза фармацевтических препаратов от бессонницы и заканчивая технологиями, целью которых является улучшение функций мозга. Нейротехнологии находят широкое применение. Можно выделить несколько областей: медицина, военное дело, образование.

Интеграция нейротехнологий в традиционные формы обучения пока недостаточно методически обеспечена, в связи с чем формирование квалифицированных специалистов происходит в высокотехнологичных производствах. Поэтому актуальна проблема методического сопровождения образовательной деятельности в области нейротехнологий. Нами разработана лабораторная работа «Измерение уровня стресса с использованием нейроинтерфейса».

В данной работе рассматривается изменение коэффициентов нейромедитации и нейроконцентрации в состоянии стресса.

Под нейромедитацией понимается постепенный сознательный процесс, направленный на психологическое и физическое расслабление. Нейроконцентрация – процесс, направленный на концентрацию внимания. Под отслеживанием состояний понимается измерение мозговой активности при помощи нейроинтерфейса на протяжении всего процесса нейромедитации и нейроконцентрации. Для определения состояния мозговой активности используются значения коэффициента медитации и коэффициента концентрации [1].

Коэффициент медитации – комплексное нормированное значение, характеризующее уровень расслабления человека. Коэффициент концентрации – комплексное нормированное значение, характеризующее уровень концентрации и активности человека. Большинство существующих нейроинтерфейсов предоставляют эти значения наравне

с сырыми данными об электрической активности мозга. Такие данные с нейроинтерфейса поступают непрерывно [2].

Для выполнения лабораторной работы предлагается использовать нейроинтерфейс Brain Link Lite.

Технические характеристики интерфейса:

- совместимость – iOS/Android/Windows/MAC OS;
- чип ЭЭГ – TGAM;
- скорость передачи – 57600;
- сокет – UART RS232;
- версия Bluetooth – Bluetooth EBR;
- радиус – 10 м;
- аккумулятор – Lithium 3,7 В, 160 мА·ч;
- время работы – 4–5 ч;
- зарядка от USB;
- три сухих электрода;
- три лобных электрода – EEG, GND, REF;
- длина повязки – 730 мм;
- вес – 30 г.

Нейрогарнитура Brain Link Lite – устройство, предназначенное для медитации и концентрации. Brain Link Lite оснащен тремя лобными датчиками, которые считывают нейроимпульсы коры головного мозга. Синхронизация технологического нейрогаджета с мультимедийной техникой осуществляется при помощи соединения Bluetooth, рабочая дистанция достигает 10 м. Устройство оснащено литий-ионным аккумулятором емкостью 160 мА·ч. Оптимальное время зарядки батареи составляет 1,5 ч [3].

### **Порядок выполнения работы**

1. На обследуемого надевают нейроинтерфейс Muse, подключенный к смартфону.

2. Производится замер ритмов головного мозга в течение трех минут в состоянии спокойствия, а затем в течение трех минут при включенных звуках, которые вызывают стресс согласно психологическим исследованиям.

3. Показания записываются в файл .csv. Эта база данных будет содержать записи об уровне состояния медитации и концентрации обследуемого.

### **Результаты эксперимента**

В эксперименте участвовали 50 студентов. Результаты эксперимента одного испытуемого представлены в таблице 1.

На основе этих данных построены диаграммы (рисунки 1 и 2).

Таблица 1 – Результат эксперимента

Номер опыта	Коэффициент медитации		Коэффициент концентрации	
	Без звука	Со звуком	Без звука	Со звуком
1	0	38	0	54
2	0	34	0	69
3	0	50	0	54
4	54	67	38	48
5	78	84	47	54
6	100	91	60	53
7	94	80	61	56
8	87	78	60	56
9	66	64	48	51
10	88	64	47	43
11	100	54	67	54
12	100	51	88	61
13	100	56	100	64
14	96	54	100	70
15	75	56	100	56
16	78	47	81	61
17	56	44	70	67
18	74	47	74	54
19	80	48	69	51
20	78	43	64	40
21	100	51	81	29
22	100	56	75	38
23	100	69	66	40
24	97	54	91	48
25	90	61	100	48
26	74	43	100	50
27	81	29	100	50
28	83	54	97	60

Анализируя диаграммы, приходим к выводу, что уровни концентрации и медитации выше, когда человек не подвержен стрессу. В данном случае стрессовое состояние вызывает специальное аудиосопровождение.

### Коэффициент медитации

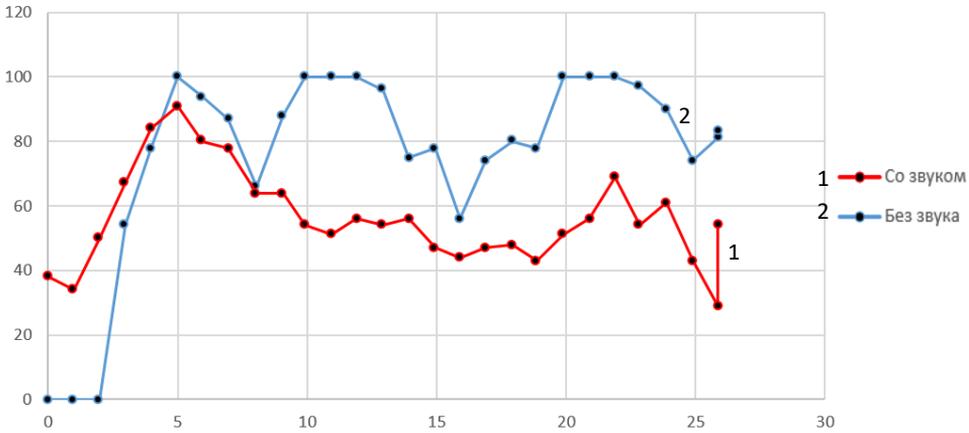


Рисунок 1 – Диаграмма коэффициентов медитации

### Коэффициент концентрации

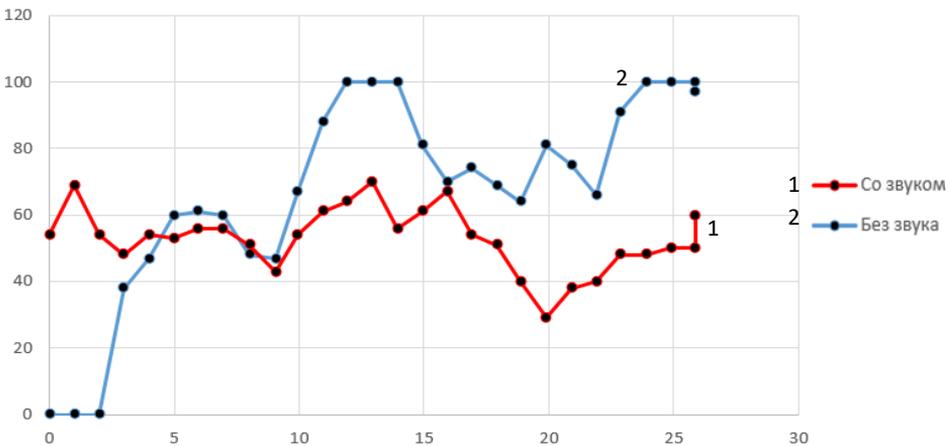


Рисунок 2 – Диаграмма коэффициентов концентрации

### Список использованной литературы

1. Нейромедитации: чем они отличаются от привычных медитаций. URL: <https://yogajournal.ru/body/practice/meditation/neuromeditatsii-chem-oni-otlichayutsya-ot-privychnykh-meditatsiy/> (дата обращения: 13.06.2023).

2. Медитация и нейропластичность. Результаты исследования медитации с помощью рекуррентной энтропии ЭЭГ. URL: <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=13133> (дата обращения: 15.06.2023).

3. Нейрогарнитуры – оборудование для нейробиоуправления.  
URL: <http://neuroforsage.ru/neurointerface/> (дата обращения:  
20.06.2023).

---

*Алымкулова Анель Кубатовна – магистр, каф. управления инновациями, Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 634050, г. Томск, ул. Вершинина, 74, e-mail: geo\_baulina@mail.ru.*

*Лобода Юлия Олеговна – канд. пед. наук, доцент, каф. управления инновациями, Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 634050, г. Томск, ул. Вершинина, 74, e-mail: yulloboda@gmail.com.*

*Бирюкова Наталья Сергеевна – ассистент, каф. управления инновациями, Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 634050, г. Томск, ул. Вершинина, 74, e-mail: natalia.s.biriukova@tusur.ru.*

**DEVELOPMENT OF THE LABORATORY WORK  
«MEASURING STRESS LEVELS USING A NEUROINTERFACE»**

*The article proposes a variant of laboratory work for students of higher educational institutions studying neurotechnologies.*

**Keywords:** *experiment, neurotechnologies, laboratory work, neurointerface*

*Alymkulova Anel Kubatovna – Master of the Department of Innovation Management, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 634050, Tomsk, st. Verшинina, 74, e-mail: geo\_baulina@mail.ru.*

*Loboda Yuliya Olegovna – Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor of the Department of Innovation Management, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 634050, Tomsk, st. Verшинina, 74, e-mail: yulloboda@gmail.com.*

*Biryukova Natalya Sergeevna – Assistant of the Department of Innovation Management, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 634050, Tomsk, st. Verшинin, 74, e-mail: natalia.s.biriukova@tusur.ru.*

Н.А. Коваль

**СПОСОБ ОЦЕНКИ ДОПЛЕРОВСКОЙ ЧАСТОТЫ ЦЕЛИ  
ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ УВОДЯЩЕЙ ПОМЕХИ ПО СКОРОСТИ  
С КВАДРАТИЧНЫМ ЗАКОНОМ УВОДА**

*Рассматривается применение аппарата искусственных нейронных сетей в задаче оценки доплеровской частоты цели. Показано, что данную задачу в контексте машинного обучения можно свести к задаче обработки временных последовательностей. Приведены результаты обучения нейронной сети.*

**Ключевые слова:** нейронные сети, глубокое обучение, радиолокационный сигнал, уводящая помеха, спектр

Как известно, радиолокационные сигналы подвержены воздействию различного рода помех. Особое место занимают имитирующие помехи системам автоматического сопровождения (уводящие помехи). Средства создания уводящих помех способны генерировать излучения, в которые плавно вносится ложная информация о параметрах движения цели (например, доплеровской частоте или времени запаздывания), что в конечном итоге приводит к срыву автоматического сопровождения [1, 2].

Для бортовых доплеровских радиолокационных станций (РЛС) наибольшую опасность представляют уводящие помехи по скорости (УПС). Решением данной проблемы может стать получение оценок доплеровской частоты сигнала цели несмотря на воздействие УПС. Поэтому в данной работе исследуются возможности аппарата искусственных нейронных сетей (глубокого обучения). Идея состоит в выявлении нейронными сетями закономерностей в характерной динамике спектра принятого РЛС сигнала при воздействии УПС в процессе их обучения, что позволит решить поставленную задачу.

Для определения характерной динамики необходимо учитывать временную взаимосвязь спектров, полученных на последовательных тактах работы РЛС, что явным образом приводит нас к задаче обработки временных последовательностей. В свою очередь оценка частоты сигнала цели сводится к определению порядкового номера доплеровского фильтра, что по сути является дискретизацией частотной области, то есть каждому фильтру ставится в соответствие определенный диапазон частот анализируемого в данный момент времени сигнала. Таким образом, эту задачу можно представить в виде регрессии спектра (преобразование спектра в номер доплеровского фильтра сигнала цели).

Для обучения нейронной сети была получена выборка данных объемом 4000 примеров путем имитационного моделирования процессов функционирования бортовой РЛС в среде Matlab/Simulink в условиях воздействия УПС с квадратичным законом увода.

На рисунках 1, 2 представлен пример из обучающей выборки.

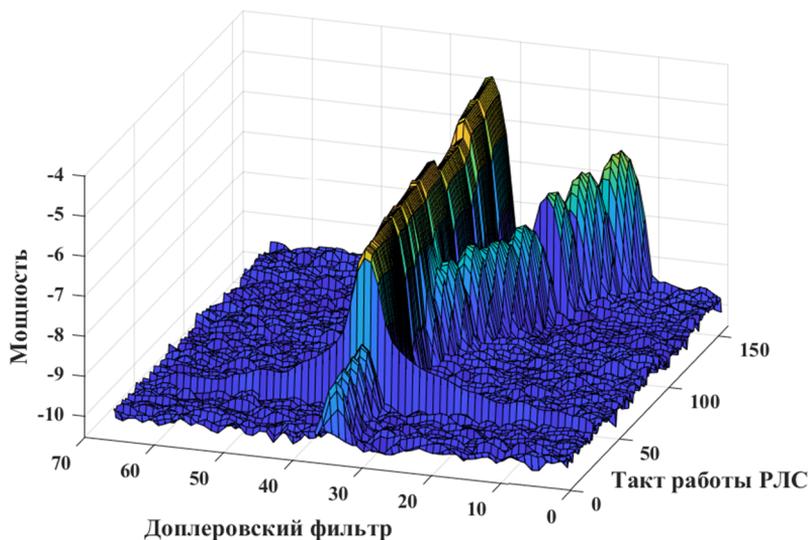


Рисунок 1 – Спектр принимаемого сигнала

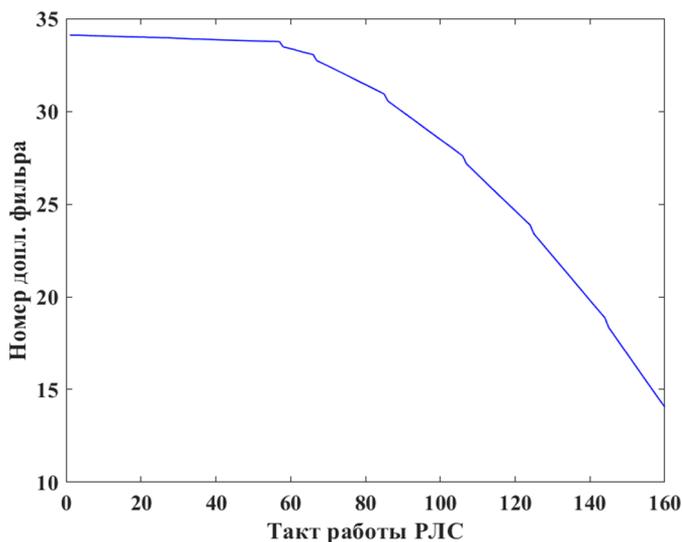


Рисунок 2 – Последовательность целевых значений номера фильтра с целью

Для разработки нейросетевых моделей использовалась среда Matlab с пакетом Deep Learning Toolbox. На полученных данных была обучена модель архитектуры LSTM [3] с двумя слоями по 100 скрытых блоков. В качестве функции потерь (loss function) для задачи регрессии выбрана среднеквадратичная ошибка (MSE). Обучение проводилось алгоритмом Adam [4] в течение 10 эпох с применением L2 регуляризации градиентов, начальная скорость обучения – 0,01 с понижением в 10 раз каждые 3 эпохи.

Для оценки качества обученных моделей использовался корень среднеквадратичной ошибки (RMSE). В результате обученная модель показала ошибку в определении номера фильтра на тестовой выборке – 1,2 RMSE. На рисунке 3 представлены результаты работы нейросетевой модели на примере из тестовой выборки.

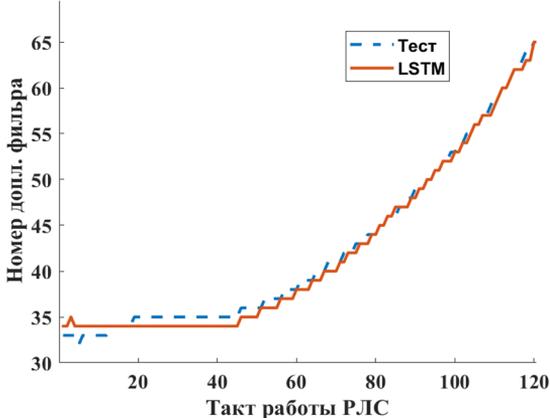
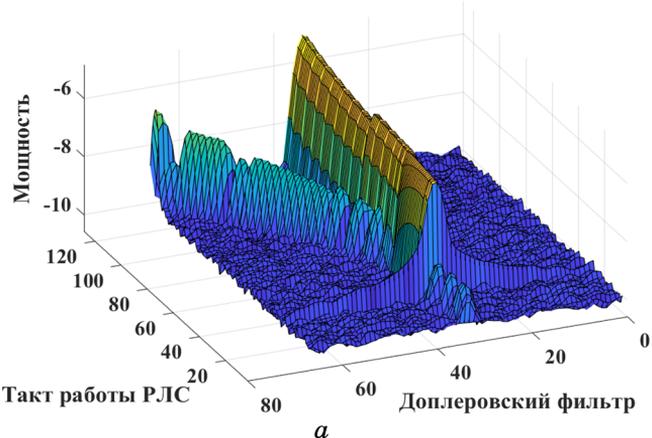


Рисунок 3 – Пример работы модели: *a* – вход; *б* – сравнение выхода модели с целевым значением номера фильтра

Таким образом, показано, что нейронные сети способны достаточно точно оценить доплеровскую частоту цели при воздействии на РЛС уводящей помехи по скорости с квадратичным законом увода. В дальнейшем предполагается провести сравнительный анализ с другими архитектурами глубокого обучения.

### Список использованной литературы

1. Леонов А.И., Фомичев К.И. Моноимпульсная радиолокация. М. : Сов. радио, 1970. 392 с.
2. Берикашвили В.Ш., Черепанов А.К. Радиотехнические системы извлечения и обработки информации. Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет). М., 2011. 272 с.
3. Hochreiter S., Schmidhuber J. Long short-term memory // Neural computation. 1997. V. 9(8). P. 1735–1780.
4. Kingma, Diederik, Jimmy Ba. Adam: A method for stochastic optimization // arXiv preprint arXiv:1412.6980. 2014.

---

*Коваль Никита Александрович – аспирант, каф. 609 «Прикладная информатика», Московский авиационный институт, 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, e-mail: niki-kov@yandex.ru.*

### **METHOD OF ESTIMATION OF DOPPLER FREQUENCY OF THE TARGET UNDER THE INFLUENCE OF VELOCITY JAMMER**

*The application of artificial neural networks in the task of estimating the Doppler frequency of the target is considered. It is shown that this task in the context of machine learning can be reduced to the task of time sequence processing. The results of training of the neural network are presented.*

**Keywords:** *neural networks, deep learning, radar signal, velocity jammer, spectrum*

*Koval Nikita Alexandrovich – postgraduate student, Department 609 «Applied Informatics», Moscow Aviation Institute, 125993, Moscow, Volokolamskoe shosse, 4, e-mail: niki-kov@yandex.ru.*

Д.Е. Кузьменко, А.Ю. Кайда

## ПОТОКОВАЯ АСИНХРОННАЯ ПЕРЕДАЧА ДАННЫХ МЕЖДУ МОДУЛЯМИ В ETL-КОНВЕЙЕРЕ

*Рассматривается механизм асинхронной передачи данных между модулями в ETL-конвейере. Описана причина, блокирующая асинхронную передачу данных, и решение, позволяющее избежать поэтапного режима передачи. Приведено схематичное представление модулей ETL-конвейера. Представлены результаты работы.*

**Ключевые слова:** ETL-конвейер, потоковая обработка, асинхронная передача данных

С ростом популярности онлайн-сервисов объемы передаваемых данных многократно выросли, в связи с чем широко используются децентрализованные способы их обработки и хранения. Данные, собранные из разных источников, требуют передовых аналитических инструментов для их передачи, обработки и хранения [1].

Конвейер, в частности ETL, состоит из модулей, которые обмениваются между собой данными [2]. Проходящие через конвейер данные обрабатываются в потоковом режиме. Поток данных – это упорядоченная последовательность данных, которой соответствует определенный источник или получатель. ETL-процесс присутствует в каждом из модулей конвейера, он включает в себя: извлечение данных из внешних источников (extract); их преобразование для соответствия заданным условиям (transform); загрузку их в последующий модуль или в хранилище данных (load) [3]. Схема ETL-процесса приведена на рисунке 1.



Рисунок 1 – Схема ETL-процесса

Для разработки модулей ETL-конвейера выбран язык программирования Python. С помощью библиотеки `os` и методов стандартного ввода `stdin()` и вывода `stdout()` данные передаются между модулями [4]. Конвейер запускается с помощью `bash`-скрипта.

Схема ETL-конвейера приведена на рисунке 2.

При работе ETL-конвейера возникает следующая особенность (сценарий поэтапной обработки). Данные, поступающие на вход, обрабатываются в конвейере поэтапно. На вход каждого модуля подается весь

объем передаваемых данных. Пока текущий модуль не завершит свою работу, данные не поступят на вход последующего модуля. На выходе с конвейера получается единым файлом весь массив данных, прошедший обработку, в зависимости от заданной логики для каждого модуля конвейера.

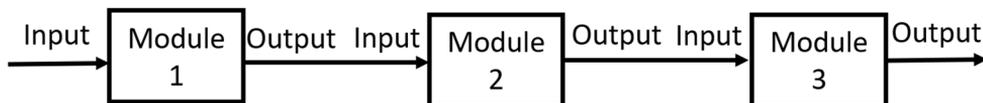


Рисунок 2 – Схема ETL-конвейера

В случае необходимости обработки данных свыше 100 Мбайт и получения итоговых данных асинхронно, то есть не дожидаясь завершения работы каждого модуля с полным объемом данных, поэтапный режим работы ETL-конвейера для текущего сценария не подходит.

При работе конвейера весь массив информации на входе и выходе из модулей кэшируется в память. Именно поэтому процесс передачи данных между модулями происходит поэтапно.

Чтобы исключить поэтапный режим работы между модулями, необходимо очищать буфер данных на каждом этапе вывода информации из модуля.

При построении конвейера с асинхронной передачей данных между модулями необходимо использовать сигнал, который обозначает конец передаваемого сообщения. Для этого можно применить символ, обозначающий новую строку (*new line*).

После того как стандартный вывод напечатает сигнал, обозначающий конец сообщения, необходимо поставить конструкцию очистки буфера памяти. При помощи библиотеки *os* и метода *flush()* производится удаление записей из кэша внутреннего файла [4].

После применения вышеописанных конструкций удастся добиться асинхронного вывода данных с конвейера.

На рисунке 3 приведена зависимость времени обработки от количества поступивших на вход текстовых документов.

Достоинства описанного решения:

1) увеличение скорости обработки данных по сравнению с поэтапной передачей в среднем на 6% (см. рисунок 3);

2) возможность обработки выходных данных асинхронно, а не по завершению работы всего конвейера, что значительно экономит время на последующие преобразования.

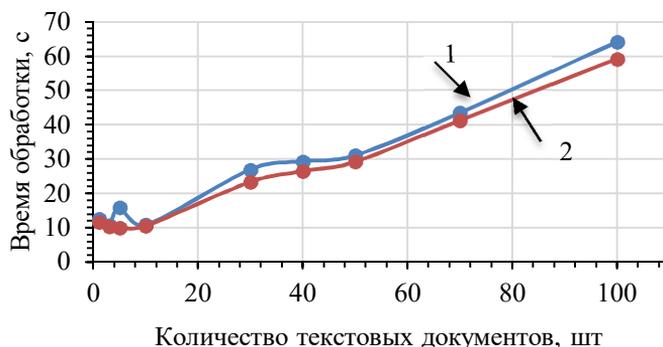


Рисунок 3 – Зависимость времени обработки от количества поступивших на вход текстовых документов при работе ETL-конвейера:  
 1 – ETL-конвейер с поэтапной передачей данных между модулями;  
 2 – ETL-конвейер с асинхронной передачей данных между модулями

### Список использованной литературы

1. Knowledge Graphs and Big Data Processing: сайт SpringerLink. URL: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-53199-7\\_1](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-53199-7_1) (дата обращения: 20.08.2023).
2. A generic and customizable framework for the design of ETL scenarios: сайт ScienceDirect. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306437904000985> (дата обращения: 21.08.2023)
3. Big Data Ecosystem: сайт ScienceDirect. URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/computer-science/big-data-ecosystem#:~:text=Big%20data%20ecosystem%20is%20the,potentials%20of%20big%20data%20analytics> (дата обращения: 18.08.2023).
4. Os – Miscellaneous operating system interfaces: сайт Python. URL: <https://docs.python.org/3/library/os.html>.

---

*Кузьменко Даниил Евгеньевич – магистрант ИШИТР, Национальный исследовательский Томск. политехн. ун-т, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, e-mail: dek29@tpu.ru.*

*Кайда Анастасия Юрьевна – ст. преподаватель ОИТ, ИШИТР, Национальный исследовательский Томск. политехн. ун-т, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, e-mail: ayk13@tpu.ru.*

### ASYNCHRONOUS STREAM PROCESSING OF ETL PIPELINE MESSAGES

*The article discusses the mechanism of asynchronous data transfer between modules in the ETL pipeline as a solution to avoid the step-by-step mode of data transfer. A schematic representation of the ETL pipeline modules and the results of the implementation of describes approach are given.*

**Keywords:** ETL pipeline, streaming processing, asynchronous data transfer

*Kuzmenko Daniil Evgenievich – Master's student, Division for Information Technology, School of Computer Science & Robotics, National Research Tomsk Polytechnic University, 634050, Tomsk, Lenin Ave., 30, e-mail: dek29@tpu.ru.*

*Kaida Anastasiia Yuryevna – Senior lecturer, Division for Information Technology, School of Computer Science & Robotics, National Research Tomsk Polytechnic University, 634050, Tomsk, Lenin Ave., 30, e-mail: ayk13@tpu.ru.*

**УДК 004.414.28**

**М.С. Аришина, А.С. Таушканов**

## **АВТОМАТИЗАЦИЯ ПОДБОРА ДИЗАЙНА ИНТЕРНЕТ-САЙТОВ**

*Каждый человек активно пользуется возможностями, которые для него обеспечивает интернет. Владельцы интернет-сайтов заинтересованы в том, чтобы сократить собственные расходы и сделать посещение сайта для пользователей максимально комфортным.*

**Ключевые слова:** дизайн, UI-дизайнеры, UX-дизайнеры, авторский дизайн, интерфейс

Сталкиваясь с определенными проблемами в разработке дизайна, человек обычно находится в растерянности и не знает, как поступить и с чего начать. Он обращается к компаниям для создания макета дизайна. Многие компании не умеют грамотно рассчитывать средства, а также плохо понимают, что такое «комфортный» сайт.

Важным требованием к дизайну сайта является его удобство и понятность для пользователей, а также его оригинальность. В настоящее время интернет-ресурсы представляют собой сильный инструмент для продвижения компании, привлечения клиентов и нового персонала. Владельцы сайтов направляют огромные усилия на защиту данных и создание приятного пользовательского интерфейса. В соответствии со ст. 1260 ГК РФ каждый веб-сайт состоит из трех главных частей: технической, дизайнерской и информационной. По нашему мнению, дизайн является одним из главных элементов сайта сегодня. Многие пользователи отдадут предпочтение ресурсам с понятной навигацией и управлением системой, а также с привлекательной цветовой гаммой и контентом. Судебная практика вкладывает следующий смысл в понятие «дизайн»: «дизайн представляет собой вид художественной

деятельности, проектирование промышленных изделий, товаров, объектов, обладающих определенными эстетическими свойствами» [1]. Дизайн сайта является составным понятием и включает в себя его графическое наполнение, использование на сайте определенных изображений, цветовую гамму, размещение информации (как текстовой, так и графической) в определенном порядке и т.д. Дизайн сайта признается объектом авторского права. В соответствии с законодательством РФ дизайн – объект авторского права, так как для защиты авторских прав не требуется регистрация какого-либо предмета или соблюдение каких-либо иных формальностей. Охрана дизайна веб-сайта зависит от соответствия его критериям охраноспособности.

1. При создании дизайна сайта необходимо учитывать, что он должен быть индивидуальным и отображать авторскую творческую работу. Законодательство не определяет конкретные критерии творчества, однако отсутствие новизны и оригинальности не означает отсутствия творческого труда и авторской защиты. Критерии творческой работы можно определить по элементам дизайна, например шрифту, цвету, размеру и расположению. Постановление Пленума Верховного Суда РФ № 10 от 23.04.2019 отмечает, что отсутствие новизны, уникальности и оригинальности не может говорить о том, что результат не создан творческим трудом и не защищен авторским правом [2].

2. Дизайн должен быть оформлен в виде макета или в любой другой объективной форме. Для правообладателя важно иметь документы, подтверждающие принадлежность прав на дизайн сайта. Если автор сам создал дизайн, он может зафиксировать свои авторские права.

Неважно, какой контент содержит веб-сайт. Любой человек обратит внимание на красивый дизайн, который играет главную роль в успешной стратегии продаж. Правильный дизайн и цветовая палитра помогут воспринимать ценность товаров или услуг [3]. Восприятие дизайна веб-сайта человеком происходит сразу, как только он попадает на ресурс [4]. Хороший веб-сайт можно определить по нескольким критериям.

Визуальная привлекательность. Она помогает пользователям представить все, что нужно от сайта. Люди обретают впечатление о сайте за пару секунд: все зависит от картинок, цвета и шрифтов. Все это может оттолкнуть пользователя и заставить его покинуть данный сайт (сервис) или, наоборот, привлечь.

Цвет – мощный инструмент, с помощью которого можно получить хорошие эмоции. Цветовую палитру необходимо использовать, чтобы привлечь внимание к другим вкладкам интернет-сайта. Контрастные цвета обеспечивают читаемость текста [2].

Шрифты. Каждый пользователь желает увидеть на интернет-сайтах захватывающую типографику. Стоит использовать непохожие типы

шрифтов, чтобы обратить внимание на места, куда может зайти пользователь и где ему будет интересно.

Таким образом, грамотное оформление дизайна интернет-сайтов может привлечь любого пользователя, но для этого необходимо иметь навык в работе с разными средствами разработки дизайна.

На данный момент имеется много различных инструментов для разработки дизайна. Неважно, какую задачу мы хотим реализовать, всегда найдется инструмент, приложение или функция, которые помогут ускорить процесс реализации и сократить затраты времени и ресурсов.

InVision Stidio – это утилита UI дизайнеров, которая объединяет важные функции и инструменты для быстрого создания прототипов красивых интерактивных интерфейсов. С помощью этой программы можно легко создавать разнообразные сложные переходы и реализовывать анимацию высокого уровня. Благодаря механизму верстки, дизайн адаптируется под любой экран.

Bohemian Coding Sketch – одна из распространенных онлайн-платформ для разработки дизайна. Это мощный инструмент, который позволяет создавать интерфейсы, макеты и обеспечивает совместную работу. Sketch предназначен для создания дизайна сайтов и приложений.

Figma – инструмент для разработки интерфейсов, позволяющий нескольким дизайнерам работать в режиме реального времени. Он доступен всем пользователям и отличается простым в использовании интерфейсом. С помощью этого инструмента можно быстро создавать дизайн для компьютеров, планшетов или мобильных устройств.

Adobe XD – это программное обеспечение, которое предназначено для разработки векторного дизайна и моделирования каркасов. В нем имеются инструменты рисования, возможность предварительного просмотра на различных устройствах и функция совместного использования.

Marvel – еще один инструмент для разработки веб-дизайна, который прекрасно подходит для быстрой реализации идей, улучшения интерфейсов и создания прототипов. Он обеспечивает эффективный способ создания страниц, что позволяет имитировать дизайн с помощью прототипа [5].

Проектирование включает в себя исследование процессов и шаблонов на различных этапах с целью удовлетворения пользователя. В рамках этих процессов AI предлагает множество жизнеспособных вариантов в заданный период времени. Затем AI тестирует эти варианты, регистрирует особенности пользовательского поведения и с помощью аналитики выбирает лучшую концепцию.

Результаты этой работы, представленные в форме макетов и технических спецификаций, передаются команде разработчиков, которые полностью оптимизируют их для внедрения в движки, обеспечивающие идеальные и точные UI-разметки и поведение. Система контроля качества также оптимизируется, чтобы минимизировать вероятность

человеческой ошибки и обеспечить продукт, отвечающий степени минимально приемлемого качества. Такая удобная система позволяет достичь гармонии в командах и устранить проблемы прошлого.

Труд, основанный на повторяемых действиях, и сложные задачи теперь можно разбить на автоматизированные ступени: от разработки до тестирования, запуска и реального функционирования в руках клиентов. Помимо автоматизации разработки, дизайн должен иметь четкую концепцию, которая рассматривается как итоговый продукт.

В заключение можно отметить, что в данный момент существует много инструментов для упрощения подбора и разработки дизайна интернет-сайтов. Это позволяет сэкономить огромное количество времени и средств. Из всех представленных выше вариантов можно выделить инструмент Figma, который среди своих «конкурентов» достаточно прост в использовании и многофункционален. Его можно использовать не только для разработки интерфейсов веб-приложений, но и для desktop-приложений, презентаций, android-приложений и т.д.

### Список использованной литературы

1. Определение Московского городского суда от 30.11.2018 г. по делу № 2и2939/2018. URL: <https://www.consultant.ru/search/?q=%D0%BF%D0%BE+%D0%B4%D0%B5%D0%BB%D1%83+N+2%D0%B82939%2F2018+>.

2. Постановление Пленума Верховного Суда РФ от 23.04.2019 № 10 «О применении части четвертой Гражданского кодекса Российской Федерации» // Российская газета. 2019. № 96.

3. Маркотт Итан. Отзывчивый веб-дизайн. Сер. Актуальные книги для тех, кто создает сайты. М., 2017. Кн. 1. 686 с.

4. Сырых Ю.А. Современный веб-дизайн. Настольный и мобильный. М. : Диалектика/Вильямс, 2019. 384 с.

5. Инструменты для веб-дизайна. URL: <https://say-hi.me/design/web-design/52-instrumenta-dlya-veb-dizajna-kotorye-uluchshat-vashu-rabotu-v-2020-godu.html>.

---

*Аришина Маргарита Сергеевна – студент гр. 441-1, каф. автоматизированных систем управления, Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 634050, г. Томск, e-mail: arishina2003@mail.ru.*

*Таушканов Александр Сергеевич – студент гр. 421-4, каф. автоматизации обработки информации, Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 634050, г. Томск, e-mail: taushkanov.a.s@mail.ru.*

## **AUTOMATION OF WEBSITE DESIGN SELECTION**

*Every person actively uses the opportunities that the Internet provides for him. The owners of Internet sites are interested in reducing their own expenses and making sites as comfortable as possible for users.*

**Keywords:** *design, UI designers, UX designers, author's design, interface*

*Arishina Margarita Sergeevna – student of group 441-1, Department of control system security, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 634050, Tomsk, e-mail: arishina2003@mail.ru.*

*Taushkanov Alexander Sergeevich – student of group 421-4, Department of Automation of Information Processing, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 634050, Tomsk, e-mail: taushkanov.a.s@mail.ru.*

## Секция 5. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВУЗОВ С ПРЕДПРИЯТИЯМИ ОПК

---

УДК: 001.57, 004.942, 51.7, 519.876.5, 65.01, 681.5, 811.161.1, 82

М.В. Турилова, К.С. Кравцов

### РАЗВИТИЕ НАВЫКОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ У ДЕТЕЙ

*Представлен обзор научно-популярных и художественных книг и фильмов, ресурсов дополнительного образования, полезных в обучении математическому моделированию сложных систем.*

**Ключевые слова:** *дополнительное образование, книга, математическое моделирование, русский язык, спортивное ориентирование, туристический поход, уборка класса, школьное мероприятие*

*Ибо кто из вас, желая построить башню, не сядет прежде и не вычислит издержек, имеет ли он, что нужно для совершения ее, дабы, когда положит основание и не сможет совершить, все видящие не стали смеяться над ним, говоря: этот человек начал строить и не мог окончить?*

*Евангелие от Луки, глава 14, стихи 28–30*

Еще в дореволюционное время студенты инженерных училищ и университетов занимались с дворянскими детьми точными науками и языками для подготовки их к обучению в гимназии или в качестве дополнительных занятий [1]. В советское время при основных высших учебных заведениях были созданы специализированные школы (школа-интернат им. А.Н. Колмогорова МГУ им. М.В. Ломоносова) или вечерние курсы для старшеклассников (вечерняя Физико-математическая школа МГТУ им. Н.Э. Баумана). Активно действовали различные кружки для детей и клубы для взрослых (радиолюбителей, авиамоделирования и другие). В дневниковых записях калужанина И.Г. Четверикова (1909–1967) показана освобожденная от фашистов Калуга весной – летом 1942 г. Автор служил инженером связи в составе военно-восстановительной службы. В заметках он описал свое увлечение радиолубительским делом, сбором телевизоров [2].

Для обучения детей математическому моделированию – расчетам при планировании серий действий в сложных системах [3] – можно

использовать любое событие и дело (например, организацию школьного праздника или уборку класса). Ресурсы дополнительного образования для детей и подростков (туристические походы и соревнования, занятия спортивным ориентированием и другие) позволяют смоделировать различные ситуации, в которых участникам требуется применить разные умения и навыки. При подготовке к туристическим походам и соревнованиям, на занятиях спортивным ориентированием школьники учатся планировать маршрут, рассчитывать бюджет похода с учетом стоимости питания, снаряжения, починки снаряжения, транспортных и возможных медицинских расходов, экскурсионного обслуживания, затрат на проживание в других населенных пунктах, непредвиденных расходов. Они продумывают действия в штатных и нештатных ситуациях, изучают основы медицинской помощи, распределяют роли и обдумывают командное взаимодействие и совместную работу.

Научно-популярные [4–6] и художественные книги способствуют развитию математических умений и навыков, учат математическому моделированию действий и объектов. Перед революцией и в СССР выходили научно-популярные книги для взрослых и для детей. Известна серия научно-популярных книг русского и советского математика и физика, журналиста и педагога Я.И. Перельмана (1882–1942): «Занимательная физика», «Веселые задачи», «Далекие миры. Астрономические очерки», «Занимательная геометрия», «Занимательная арифметика», «Занимательная математика», «Занимательная астрономия». Его дипломная работа на тему «Старорусский казенный лесопильный завод. Его оборудование и работа» (1908 г.) в Лесном институте Санкт-Петербурга – пример математического и экономического моделирования. Он переписывался с К.Э. Циолковским, разрабатывал его идеи межпланетных сообщений. В 1914 г. опубликовал «научно-фантастическую» (этот термин он придумал сам) главу «Завтрак в невесомой кухне» к роману Ж. Верна «Из пушки на Луну», которую также можно считать ярким примером математического моделирования. В 1917 г. по предложению Перельмана, служившего в Особом совещании по топливу в Петрограде, в России было введено «летнее время». Он был членом редколлегии журналов «Природа и люди», «Наука и техника», участвовал в выпуске книг занимательной серии издательства «Время», разрабатывал ракеты, научно-технические задания в области воздушной техники. В июле 1941 – феврале 1942 гг., до самой смерти от голода в блокадном Ленинграде, читал советским разведчикам и партизанам лекции об ориентировании на местности без приборов [7].

Личности ученых и естествоиспытателей всегда привлекали к себе внимание обычных людей. События их жизни становились материалом для документальных и художественных книг, иногда скандального, хотя и поучительного оттенка [8].

Книги Ж. Верна, В. Скотта, М. Рида, Дж. Лондона, детективы, фильмы-боевики, другие примеры «массового» искусства показывают модели решения разных задач. Художественную литературу вообще можно считать примером математического моделирования, хотя не все писатели просчитывают и проверяют на практике созданные ими миры и события и описания могут не соответствовать законам природы и человеческих отношений. Например, почему князь Андрей Болконский не любит свою жену, беременную маленькую княгиню, и демонстрирует это Петру Безухову, если он ей не изменял?

В художественных книгах для детей есть приборы и механизмы, законы природы, которые не упомянуты в школьном курсе по физике или химии. В повести Кира Булычева «Сто лет тому вперед» об Алисе Селезневой (1977) показаны фантастические приборы: телевизор в виде наручных часов, флипы и порталы для телепортации, миелофон для чтения мыслей. Как известно, многое из придуманного фантастами уже существует в реальном мире. В повести «Хронометр» (трилогия «Острова и капитаны», 1984–1986) В.П. Крапивин изображает старинные корабельный хронометр и камеру-обскура.

Математические навыки можно развивать уже в дошкольном возрасте. Хорошо известна математическая сказка для дошкольников «Приключения Кубарика и Томатика, или Веселая математика» Г.В. Сапгира, Л.А. Левиновой, Ю.П. Луговской с иллюстрациями В. Стацинского [9], помогающая родителям учить малышей счету и некоторым математическим понятиям. Это может сопровождаться практическими занятиями в быту [10].

Книга «Мальши и математика. Домашний кружок для дошкольников» профессионального математика А.К. Звонкина [11] обобщает опыт проведения автором домашних кружковых занятий для его детей и их друзей – дошкольников, включает в себя дневниковые записи, заметки о математике и психологии детей, описания математических задач.

Комплексная система образования физико-математического и других профилей с дошкольной, школьной, высшей степенями готовит специалистов высокого уровня, востребованных в нашей стране и за рубежом [12].

Я благодарю Его Высокопреосвященство митрополита Калужского и Боровского Климента, духовенство Калужской Митрополии, руководство, преподавателей, студентов Калужской духовной семинарии за возможность выполнения, обсуждения, проверки данной работы.

## Список использованной литературы

1. Аксакова (Сиверс) Т.А. Семейная хроника. В 2 кн. М. : Территория, 2005. 496 с.
2. Четвериков И.Г. Когда была война : Дневник. Калуга. 1942 год. Калуга : Типограф, 2000. 64 с.
3. Россия и КНР обратились к Японии из-за сброса радиоактивной воды в океан // Новостной интернет-портал «News.ru». URL: [https://news.ru/world/rossiya-i-knr-obratilis-k-yaponii-iz-za-sbrosa-radioaktivnoj-vody-v-ocean/?utm\\_medium=referral&utm\\_source=infox.sg&utm\\_campaign=exchange](https://news.ru/world/rossiya-i-knr-obratilis-k-yaponii-iz-za-sbrosa-radioaktivnoj-vody-v-ocean/?utm_medium=referral&utm_source=infox.sg&utm_campaign=exchange) (дата обращения: 19.08.2023).
4. Библиотечка «Квант». Вып. 1–138. М. : Наука, 1980–2023. URL: [http://www.publ.lib.ru/ARCHIVES/B/'Bibliotечka\\_'Kvant'\\_seriya\)/\\_BK.html](http://www.publ.lib.ru/ARCHIVES/B/'Bibliotечka_'Kvant'_seriya)/_BK.html) (19.08.2023). (Заславский А.А. Олимпиады имени И.Ф. Шарыгина (2010–2014). Вып. 134. Приложение к журналу «Квант», № 2/2015. М. : МЦНМО, 2015. 168 с.).
5. Гейзенберг В. Физика и философия. Часть и целое. М. : Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. 400 с.
6. Капица П.Л. Эксперимент. Теория. Практика : статьи, выступления. М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит, 1974. 288 с.
7. Перельман, Яков Исидорович // Википедия. Свободная энциклопедия. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D0%BC%D0%B0%D0%BD,%D0%A%D0%BA%D0%BE%D0%B2%D0%98%D1%81%D0%B8%D0%B4%D0%BE%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D1%87> (дата обращения: 14.08.2023).
8. Драгунский Д.В. Пять остановок на автобусе. Обманщики. М. : АСТ, 2021. 300 с.
9. Левинова Л.А., Сапгир Г.В. Приключения Кубарика и Томатика, или Веселая математика. М. : Педагогика, 1975. 155 с.
10. 300 полезных советов по домоводству. Л. : Лениздат, 1957. 204 с.
11. Звонкин А.К. Малыши и математика. Домашний кружок для дошкольников. М. : МЦНМО, 2006. 240 с.
12. Кравцов К.С. Лаборатория атмосферной квантовой криптографии Центра квантовых технологий МГУ // Центр квантовых технологий МГУ им. М.В. Ломоносова. URL: [https://vk.com/wall-175332122\\_58?ysclid=lecfpqr0ja15533794](https://vk.com/wall-175332122_58?ysclid=lecfpqr0ja15533794) (дата обращения: 19.08.2023).

---

*Турилова Мария Валерьевна – канд. филол. наук, независимый исследователь, Калуга, Россия, mariaturilova@mail.ru.*

*Кравцов Константин Сергеевич – д-р физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник Лаборатории атмосферной квантовой криптографии Центра квантовых технологий МГУ им. М.В. Ломоносова, доцент, каф. квантовых технологий Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН, преподаватель НИУ ВШЭ, г. Москва, Россия, ks.kravtsov@gmail.com.*

## **DEVELOPING THE MATHEMATICAL MODELLING ABILITIES OF CHILDREN**

*The article provides an overview of popular science and fiction books and films, resources of supplementary education for children and teenagers (hiking trips and competitions, orienteering activities, school events, classroom cleaning) useful in teaching mathematical modelling of complex systems.*

**Keywords:** *supplementary education, book, classroom cleaning, hiking trip, mathematical modelling, orienteering, Russian, school event*

*Turilova Mariia Valer'evna – Ph. D. (Philology), Independent Researcher, Kaluga, Russian Federation, e-mail: mariaturilova@mail.ru.*

*Kravtsov Konstantin Sergeevich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Senior Research Scientist of the Atmospheric Quantum Cryptography Laboratory (Quantum Technologies Centre, M. V. Lomonosov MSU), Assistant Professor of Quantum Technologies (A. M. Prokhorov Institute of General Physics RAS), Senior lecturer (HSE), Moscow, Russia, e-mail: ks.kravtsov@gmail.com.*

**УДК 378.14**

**И.Л. Артемов**

## **ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ШИРОКОПОЛОСНОГО РАДАРА В ОБУЧЕНИИ СТУДЕНТОВ КАФЕДРЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ И ПРОИЗВОДСТВА РАДИОАППАРАТУРЫ**

*Рассматривается опыт использования современных радаров в обучении и подготовке будущих кадров по специальности «Техническая эксплуатация транспортного радиооборудования».*

**Ключевые слова:** *локальная стажировка студента, полевые испытания, разработка программного кода на C++, радар Navico BroadBand Radar 4G, многоадресная рассылка, протокол IGMPv3*

Одним из главных направлений в развитии образования является сотрудничество университетов с предприятиями и работодателями. Современный этап исторического развития предъявляет к выпускникам университетов все более высокие требования, в частности в области электроники и информационных технологий. Известная проблема в отставании образования от требований работодателей обусловлена нехваткой преподавателей-практиков с предприятий, быстрым развитием информационных и компьютерных технологий, а также недостаточным участием преподавателей и студентов в решении производственных задач, возникающих на различных предприятиях [1].

В рамках подготовки будущих специалистов для воздушной отрасли на кафедре конструирования и производства радиоаппаратуры отводится особое внимание устранению указанной выше проблемы. Одним из подходов является прохождение локальной стажировки на кафедре в рамках учебно-проектной деятельности студента, в которой показывается неразрывная связь изученных ранее дисциплин и современного состояния радиолокационных систем.

Для получения практического опыта и закрепления пройденных предметов мы предлагаем студентам поработать с одним из современных широкополосных радаров Navico BroadBand Radar 4G, а именно разработать алгоритм обработки радиолокационных данных и программный код к нему.

Радары Navico функционируют в диапазоне частот от 9,3 до 9,4 ГГц, в режиме активной работы потребление составляет 20 Вт. Радар работает в импульсно-доплеровском режиме, когда дальность до цели вычисляется путем измерения времени задержки отраженного от нее зондирующего сигнала. Он передает данные посредством технологии Ethernet. Вся связь осуществляется с использованием многоадресных дейтаграмм UDP. Все адреса передают объявления о подписке по протоколу IGMPv3 [2].

От студента требуется умение разбираться в физических и технических принципах работы радаров, понимание, как происходит обработка данных радара программой. Таким образом, для решения поставленной задачи студент применяет свои знания, полученные по программированию, основам компьютерных сетей, радиотехническим цепям и сигналам.

Разработка программного кода включает в себя известные основные этапы: постановка задачи, выбор метода решения, разработка алгоритма и его кодирование, отладка и тестирование программы, сопровождение и эксплуатация. Студенту дается индивидуальный план по прохождению указанных этапов, выполнение которого контролируется преподавателем. Со стороны преподавателя выдается необходимая документация и оказывается информационная поддержка. Важно, что студенту не даются инструкции по работе, он принимает решения

самостоятельно. Фактически, студент разрабатывает новое решение, основываясь на примерах других проектов, имеющих готовые технических устройств и программных модулей.

Основная деятельность по разработке алгоритма, написанию кода и его тестированию проходит в одной из лабораторий кафедры. За этот период студент прорабатывает основную часть технической документации по радару, детально изучает раздел по сетевому программированию и получает ценный опыт в чтении исходных кодов программ других разработчиков.

Заключительный этап по сопровождению и эксплуатации является самым ярким и интересным в обработке данных. Для тестирования программы проводятся полевые испытания (рисунки 1, 2). В частности, в 2019 году после разработки программы на языке Python были проведены испытания программы на реке Томь. Полевые испытания являются важной частью в исследовательской работе, так как позволяют выявить многие проблемы, которые не создаются в лаборатории. Например, движение судна, помехи и ошибки при получении данных.

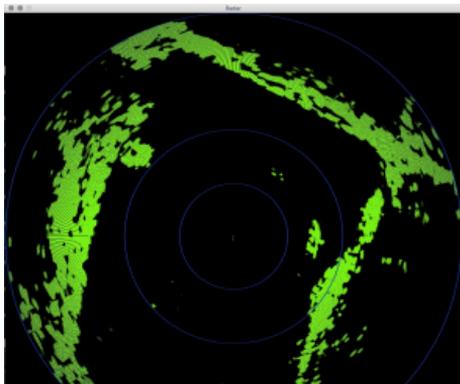


Рисунок 1 – Проход под мостом.  
Показания разработанной программы по обработке данных радара



Рисунок 2 – Полевые испытания радара французским студентом Quentin de Saint-Christophe

Данный подход применялся с успехом в 2019–2020 годах при совместном обучении студентов кафедры КИПР и студентов из Франции, приезжавших на стажировку. В 2022–2023 годах продолжается работа на кафедре КИПР, целью которой является написание программы на языке C++ с использованием библиотек boost и OpenCV.

В заключение отметим некоторые особенности данного подхода.

1. Возможность совмещения учебной деятельности с локальной стажировкой на реальном производственном оборудовании.

2. Получение студентом практического опыта работы с технической документацией разного характера и на разных языках.

3. Студенты самостоятельно проходят путь от идеи до реализации и получают практический опыт в решении нетиповых производственных задач.

### Список использованной литературы

1. URL: <https://www.vedomosti.ru/management/articles/2023/07/12/984879-85-rabotodatelei-govoryat-o-neobhodimosti?ysclid=lmqhjdqfg6713124370>.

2. Dabrowski A., Busch S., Stelzer R. A Digital Interface for Imagery and Control of a Navico/Lowrance Broadband Radar // Schlaefer A., Blaurock O. (eds). *Robotic Sailing*. Springer, Berlin, Heidelberg. 2011. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-22836-0\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-642-22836-0_12).

---

*Артемов Игорь Леонидович – канд. физ.-мат. наук, каф. радиотехнических систем, Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, email: compn@mail.ru.*

### **BROADBAND RADAR EXPERIENCE IN TEACHING STUDENTS OF THE CYPRUS DEPARTMENT**

*The article examines the experience of using modern radars in the training and training of future personnel in the specialty «Technical operation of transport radio equipment».*

**Keywords:** *local student internship, field tests, C++ code development, Navico BroadBand Radar 4G, multicast, IGMPv3 protocol*

*Artemov Igor Leonidovich – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Department of Radio Engineering System, Tomsk State University of Systems and Radio Electronics, 634050, Tomsk, pr. Lenina, 40, email: compn@mail.ru.*

С.Ю. Страхов, Н.В. Сотникова, В.М. Балашов

**ОСОБЕННОСТИ СКВОЗНОЙ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ  
ДЛЯ ПРЕДПРИЯТИЙ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ  
СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО РЕГИОНА РФ**

*Обсуждается система сквозной подготовки кадров для радиоэлектронной отрасли по схеме «школа – вуз – предприятие», основанная на тесной интеграции с работодателем на всех этапах образовательной траектории специалиста. Рассмотрен опыт ее реализации при взаимодействии БГТУ «Военмех» им. Д.Ф. Устинова и НПП «Радар ммс» на этапах довузовской профориентационной работы, периода обучения в вузе и послевузовского взаимодействия. Изложены особенности, перспективы и ограничения при реализации указанной системы подготовки кадров.*

**Ключевые слова:** довузовская подготовка, предприятие ОПК, целевая программа, обучение студентов, радиотехника, радиоэлектронные системы

Современные ФГОС и профстандарты по ряду направлений ориентированы преимущественно на подготовку специалистов по эксплуатации соответствующих систем и комплексов. Между тем современному наукоемкому предприятию необходимы выпускники, способные к созданию новых высокотехнологичных продуктов, основанных не только на известных технических решениях или их модификациях, но и на применении принципиально новых подходов, базирующихся на интеграции знаний из различных областей науки и техники. В этом случае выпускник должен обладать принципиально новыми компетенциями: способностью к системному анализу стоящей перед ним задачи, умением быть «системным интегратором» прорывных технических решений из различных областей. Он должен не только обладать базовыми навыками проектно-конструкторской деятельности (включая навыки работы в специализированных CAD/CAM/CAE системах и знания ЕСКД), но и быть способным к созданию принципиально новых систем – от выработки грамотного технического задания до выпуска конструкторской документации и отработки опытных образцов. Зачастую имеет место как отсутствие мотивации у студентов, что обусловлено их слабой связью с будущей профессией, так и случайный выбор специальности при поступлении (нет должной профориентации на довузовском этапе) [1, 2].

Следует отметить, что трудность формирования у выпускников создательных (творческих) компетенций во многом обусловлена и отсутствием такого творческого опыта у значительной части профессорско-преподавательского состава, потому что из-за большой аудиторной нагрузки, отсутствия в вузах научно-исследовательских структур, слабой связи с профильными предприятиями преподаватели не имеют возможности принять участие в реальной научной и производственной деятельности.

В Санкт-Петербурге и Северо-Западном регионе РФ располагается целый кластер предприятий радиоэлектронной промышленности (НПП «Радар ммс», АО «Заслон», АО «Лазерные системы», ВНИИРА, НПП «Меридиан», ЗРТО, ЦНПО «Ленинец», АО Концерн «Гранит-Электрон», Завод «Аванград», АО «Радиоавионика» и т.д.), для которых указанные проблемы особенно актуальны в связи с динамичным развитием информационных ресурсов, элементной базы, технологий производства современной электроники. В связи с этим необходим поиск перспективных схем подготовки кадров, которые смогут обеспечить прорывное развитие отрасли [3, 4].

Решением указанных проблем может стать реализация на базе вуза схемы обучения специалистов в рамках сквозной подготовки «школа – вуз – предприятие», основой которой является тесная интеграция с работодателем на всех этапах образовательной траектории специалиста. В БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова такая схема реализована совместно с ведущим предприятием радиоэлектронной отрасли НПП «Радар ммс». В дальнейшем она может быть адаптирована для подготовки кадров по заказу любого предприятия высокотехнологического сектора производства.

Схема реализуется на трех временных промежутках: довузовская подготовка (рисунок 1), вузовская подготовка (образовательная и научная), послевузовская траектория (рисунок 2).

Довузовская часть предполагает целевую работу со школьниками по отраслевой профориентации и по профориентации, направленной на конкретный вуз – БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова. Отраслевая профориентация выполняется в структуре Санкт-Петербургского Дворца творчества юных: в профильных секциях («Радиотехника», «Информатика и программирование»), в Юношеском клубе космонавтики, а также в рамках ежегодной научной конференции для школьников и студентов «Будущее сильной России – в высоких технологиях». Отраслевая профориентация не направлена на рекламу конкретного вуза – ее задача сформировать мотивированный слой абитуриентов, желающих стать специалистами в области радиоэлектроники, радиотехники, информатики, систем управления и т.д.

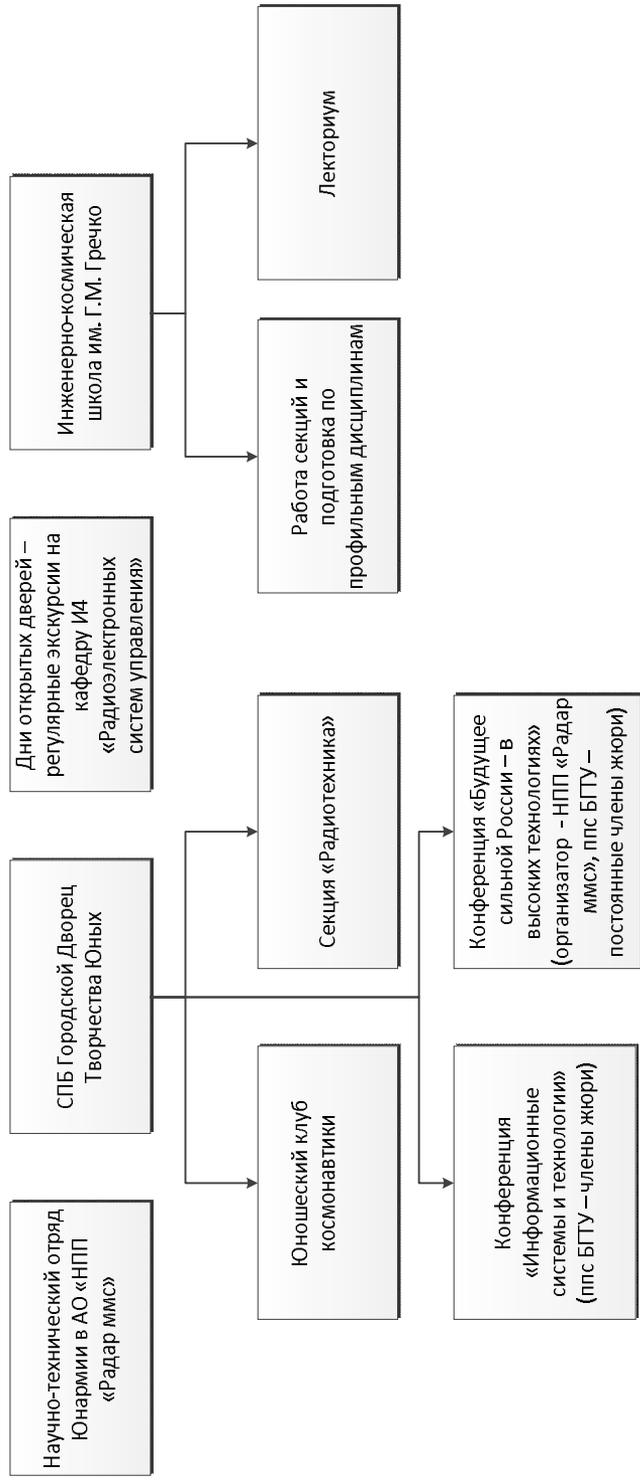


Рисунок 1 – Довузовская подготовка



Рисунок 2 – Научно-исследовательская подготовка

Другая составляющая профориентационной работы направлена не только на усиление отраслевой мотивации, но и на знакомство и привлечение абитуриентов в конкретный вуз – БГТУ «ВОЕНМЕХ». Она осуществляется на базе Инженерно-космической школы ВОЕНМЕХа в рамках занятий в профильных секциях, проведения дней открытых дверей, курсов подготовки к ЕГЭ.

После поступления абитуриентов в вуз их образовательная траектория предполагает классический образовательный процесс в рамках ФГОС по конкретной специальности (см. рисунок 1). Профильное обучение осуществляют четыре выпускающих кафедры: «Лазерная техника», «Радиоэлектронные системы управления», «Системы приводов, мехатроники и робототехники», «Системы управления и компьютерных технологий». При этом под конкретные текущие, а главное, перспективные задачи работодателя предлагается открыть пять новых профилей подготовки в рамках существующих в вузе и аккредитованных направлений и одну новую специальность.

Второй составляющей обучения студентов в формате сквозной подготовки является научно-исследовательская работа (см. рисунок 2), которая позволит сформировать у выпускников творческие компетенции инженера-разработчика, а также повысит квалификацию профессорско-преподавательского состава, руководящего научно-исследовательской работой. Особенность этого раздела обучения заключается в работе групп студентов в составе Студенческого бюро проектных инициатив (СБПИ). СБПИ является новым форматом образовательного процесса базовой кафедры «Технологии проектирования и производства радиоэлектронных систем специального назначения» БГТУ «ВОЕНМЕХ», направленным на реализацию системы проактивного обучения. Участниками СБПИ являются студенты, выполняющие

научно-исследовательские, опытно-конструкторские и проектные работы по основным тематическим направлениям деятельности работодателя. В данном случае речь идет об НПП «Радар ммс». Научно-исследовательские, опытно-конструкторские и проектные работы проводятся в рамках учебного плана базовой кафедры «Технологии проектирования и производства радиоэлектронных систем специального назначения» и во внеучебное время как добровольная дополнительная нагрузка.

Основными формами работы Студенческого проектного бюро являются:

- НИР в рамках выполнения учебных планов/индивидуальных учебных планов, в том числе при прохождении практик, курсовом и дипломном проектировании;

- инициативные НИР, выполняемые по техническим заданиям ведущих сотрудников НПП «Радар ммс», назначаемых научными руководителями проектных студенческих коллективов.

СБПИ осуществляет свою деятельность в соответствии с утвержденным исполнительным директором НПП «Радар ммс» годовым планом, разрабатываемым в целях развития научного и кадрового потенциала предприятия, повышения качества научного и образовательного процессов.

Важно отметить, что научная составляющая подготовки реализуется с участием научно-учебных лабораторий Робототехнических и мехатронных систем, Радиоэлектронных и управляющих систем, Систем технического зрения, где студенты могут получить профессиональную поддержку своих проектных инициатив со стороны профильных сотрудников.

Несмотря на рациональность и простоту схемы сквозной подготовки кадров есть ряд организационных и методических сложностей, которые возникают на пути ее реализации. Прежде всего необходимо полноценное, а не просто декларативное участие предприятия, что является серьезным ограничением, так как у предприятия не всегда есть возможность, ресурсы (материальные и кадровые) организовать тесное взаимодействие с профильным вузом. Чаще всего у предприятия есть желание получить готового специалиста, имеющего необходимые компетенции для моментального включения в работу, что не всегда достижимо. Поэтому вместо взаимодействия с вузами предприятия часто делают ставку на «доведение» выпускника до требуемого уровня уже в процессе его трудовой деятельности, на что не всегда рационально тратятся время, материальные и трудовые ресурсы. Важность взаимодействия предприятия и вуза в процессе подготовки специалиста наглядно демонстрируют статистические данные. Так, на рисунке 3 представлена диаграмма распределения студентов на преддипломную практику. Для

примера взят выпускной курс по специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы». Из диаграммы видно, что более 40 % выпускников в качестве места для прохождения практики выбрали предприятие «Радар ммс», еще 30 % – прочие предприятия отрасли и 30 % остались проходить практику на кафедре.

Такой высокий процент практикантов на предприятии «Радар ммс» не случаен. Большинство студентов, прежде чем выбрать для прохождения практики «Радар ммс», обучались с привлечением специалистов этого предприятия. Кроме того, они выбрали (и в рамках практики готовили) выпускную квалификационную работу по тематике предприятия и, как следствие, подавляющее большинство устроилось работать на «Радар ммс».

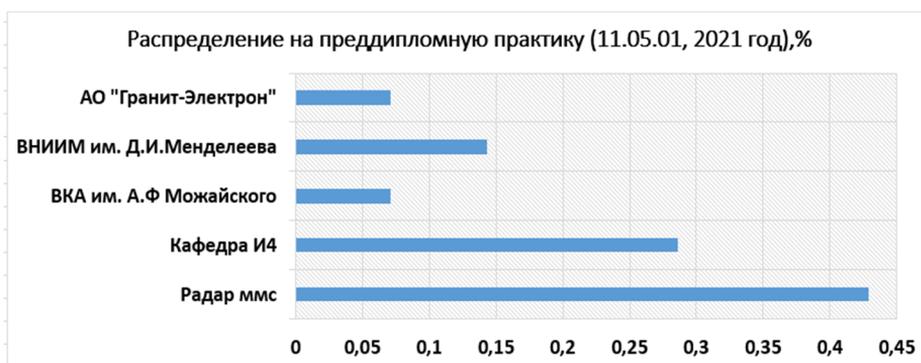


Рисунок 3 – Распределение студентов на преддипломную практику

### Список использованной литературы

1. Анцев Г.В. Цель – прогресс и процветание. Историческая хроника открытого акционерного общества «Научно-производственное предприятие “Радар ММС”». СПб. : СКИФИЯ, 2010. 496 с.
2. Борейшо А.С., Страхов С.Ю. Новые тенденции в подготовке специалистов для ОПК // Инновации. 2014. № 1 (183). С. 96–99.
3. Борейшо А.С., Иванов К.М., Страхов С.Ю. Пути совершенствования бакалаврской подготовки инженерных кадров для ОПК // Инновации. 2013. № 1 (171). С. 58–63.
4. Борейшо А.С., Страхов С.Ю. Подготовка инженеров-системщиков для оборонно-промышленного комплекса // Инновации. 2013. № 4 (174). С. 33–37.

---

*Страхов Сергей Юрьевич – д-р техн. наук, проф., декан факультета Информационных и управляющих систем, зав. каф. «Радиоэлектронные системы управления», Балтийский гос. техн. ун-т*

*«Военмех» им. Д.Ф. Устинова, 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, 1, e-mail: strakhov\_siu@voenmeh.ru.*

*Сотникова Наталья Викторовна – канд. техн. наук, доцент, доцент каф. «Радиоэлектронные системы управления», Балтийский гос техн. ун-т «Военмех» им. Д.Ф. Устинова, 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, 1, e-mail: sotnikova\_nv@voenmeh.ru.*

*Балашов Виктор Михайлович – д-р техн. наук, проф., зам. ген. конструктора по программно-целевому развитию АО «НПП “Радар ММС”», 197375, г. Санкт-Петербург, ул. Новосельковская, д. 37, лит. А, e-mail: balashov\_vm@radar-mms.com.*

### **FEATURES OF END-TO-END TRAINING OF SPECIALISTS FOR ENTERPRISES OF THE RADIO-ELECTRONIC INDUSTRY OF THE NORTH-WESTERN REGION OF THE RUSSIAN FEDERATION**

*The article discusses the system of end-to-end training for the radio-electronic industry according to the scheme «school-university-enterprise», based on close integration with the employer at all stages of the educational trajectory of the specialist. The specific experience of its implementation in the interaction of «Baltic State Technical University "VOENMEH" named after D.F. Ustinov» and Scientific and production enterprise «Radar ММС» at the stages of pre-university career guidance, the period of study at the University and postgraduate interaction is considered. The article discusses the features, prospects and limitations in the implementation of this training system.*

**Keywords:** *Pre-university training; Defense industry enterprises; target program; student training, radio engineering; radio electronic systems*

*Strakhov Sergey Yuryevich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Dean of the Faculty of Information and Control Systems, Head of the Department of Radio-Electronic Control Systems, D.F. Ustinov Baltic State Technical University «Voенmeh», 190005, St. Petersburg, 1st Krasnoarmeyskaya Street, house 1, e-mail: strakhov\_siu@voenmeh.ru.*

*Sotnikova Natalia Viktorovna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department «Radio Electronic Control Systems», Baltic State Technical University «Voенmeh» named after D.F. Ustinov, 190005, St. Petersburg, 1st Krasnoarmeyskaya Street, house 1, e-mail: sotnikova\_nv@voenmeh.ru.*

*Balashov Viktor Mikhailovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Deputy General Designer for Program and Target Development of Scientific and production enterprise «Radar ММС», 197375, St. Petersburg, Novo-selkovskaya str., 37, lit. A, e-mail: balashov\_vm@radar-mms.com.*

Б.В. Илюхин

**ВЫБОР ПРЕДМЕТОВ ЕГЭ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ –  
РИСКИ ДЛЯ СИСТЕМЫ ПОДГОТОВКИ ИНЖЕНЕРНЫХ КАДРОВ**

*Рассмотрены данные о количестве участников ЕГЭ по различным предметам. Проведен количественный анализ динамики выбора предметов для государственной итоговой аттестации. Результаты анализа свидетельствуют о необходимости дополнительной поддержки развития инженерного образования школьников.*

**Ключевые слова:** *ЕГЭ, выбор предметов, прием в вузы, проблемы набора, образовательные результаты*

Вопросы подготовки специалистов вузами Российской Федерации неоднократно обсуждались на различных уровнях управления государством, в том числе на заседании Совета при Президенте Российской Федерации по науке и образованию [1]. Подчеркивалась важность увеличения набора в вузы на специальности информационного и физико-математического профилей. При этом основным типом вступительных испытаний в вузы сегодня являются результаты единого государственного экзамена (ЕГЭ). Таким образом, ЕГЭ можно рассматривать как основной инструмент отбора абитуриентов, способных к успешному освоению программ высшего образования, а количество успешных индивидуальных результатов сдачи ЕГЭ – как индикатор конкурсной ситуации в вузах Российской Федерации.

Число участников ЕГЭ в 2023 году составило более 700 тыс., из которых около 90 тыс. – выпускники прошлых лет и обучающиеся в организациях среднего профессионального образования. По желанию в этом году ЕГЭ также сдавали выпускники школ новых субъектов Российской Федерации. Кроме того, пункты проведения ЕГЭ были организованы в 54 зарубежных странах [1].

При выборе предметов для прохождения ЕГЭ в 2023 году сохранились тенденции последних нескольких лет. Наиболее массовым предметом ЕГЭ осталось обществознание – его выбрали около 46 % участников. Увеличилось количество ребят, сдающих информатику и информационно-коммуникационные технологии (ИКТ), – до 20 %. Стабильна доля сдававших биологию – около 19 %. Реже всего (кроме французского, немецкого, испанского и китайского языков) выпускники выбирали географию, которую сдавали около 3 %. Некоторое беспокойство вызывает увеличение доли выпускников, сдающих базовую математику, – такой экзамен выпускники выбирают, если им математика не нужна при приеме в вуз. Математика – обязательный предмет, и в случае увеличения доли сдающих базовую математику снижается

доля школьников, выбравших математику на профильном уровне. Профильная математика наряду с информатикой и физикой – основной предмет при поступлении на инженерные специальности. Снижение доли выбора этого предмета может говорить об уменьшении интереса выпускников к направлениям подготовки и специальностям, связанным с математикой.

Проведенный анализ выбора предметов для прохождения итоговой аттестации по программам среднего общего образования показал, что в 2023 г. снижение числа выбравших такие предметы, как физика, биология, химия, математика (профильный уровень), является трендом последних лет. Около половины выпускников по-прежнему предпочитают обществознание в качестве предмета по выбору для сдачи ЕГЭ (рисунок 1).

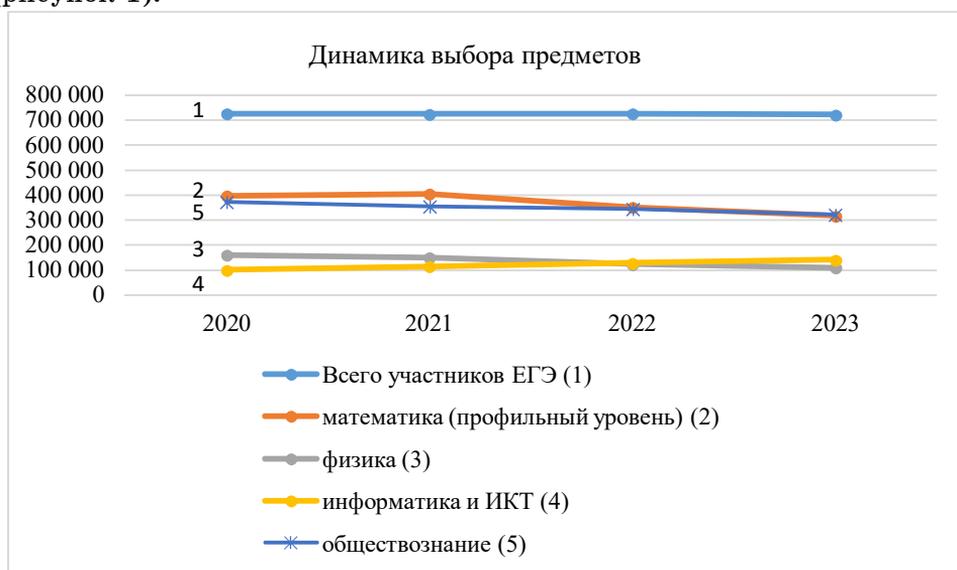


Рисунок 1 – Динамика выбора предметов ЕГЭ

Обращает на себя внимание тот факт, что рост количества участников ЕГЭ по информатике и ИКТ не компенсирует снижение числа участников ЕГЭ по физике – общее количество выбравших ЕГЭ по этим предметам 260 934 в 2020 году, 264 401 в 2021 году и 252 860 в 2022 году.

Также уменьшается количество предметов ЕГЭ, которое выбирает среднестатистический выпускник. Если в 2016–2018 годах участников ЕГЭ, которые сдавали четыре предмета и более, было около 30–40 %, то в 2023 году их доля снизилась до 15 %. Это сокращает для поступающего выбор направлений подготовки, ограничивая их только теми, где принимаются результаты именно по данным предметам. Кроме того, повышается риск не пройти по конкурсу в вуз в случае получения

невысоких результатов по одному из предметов, а если по одному из сдаваемых предметов результат ниже порогового уровня, то дорога в вуз закрывается на текущий год. Отмечается стабильная доля выпускников 11-х классов, выбирающих для прохождения государственной итоговой аттестации только два обязательных предмета, необходимых для получения аттестата. Соответственно они не могут участвовать в конкурсе на поступление в вузы (за исключением специальностей и направлений подготовки творческой и спортивной направленности). Доля таких выпускников составляет немногим менее 20 % от их общего числа.

В 2023 г. физика как предмет для сдачи ЕГЭ опустилась на шестое-седьмое место после русского языка (обязательного), математики (профильной), обществознания, которое традиционно держится высоко среди экзаменов по выбору (45 %), информатики (20 %), биологии (19 %) и истории (16 %).

Увеличение количества участников ЕГЭ по информатике и ИКТ не компенсирует снижение числа участников ЕГЭ по физике – суммарное количество школьников, выбирающих физику и (или) информатику и ИКТ, снижается.

Снижение количества выпускников, выбирающих ЕГЭ по информатике, ИКТ и (или) физике, свидетельствует о необходимости дополнительной поддержки развития инженерного образования школьников. В качестве мер поддержки может быть рассмотрено открытие программ дополнительного образования на базе предприятий, выпускающих наукоемкую продукцию, в том числе на базе предприятий ОПК. Прогнозируемый рост промышленности в условиях текущей политической ситуации должен быть заблаговременно обеспечен достаточным количеством подготовленных специалистов инженерного и физико-математического профилей.

При этом сегодня разумной альтернативы ЕГЭ нет. ЕГЭ способен эффективно дифференцировать выпускников школ по уровню знаний. Действительно, 90–100 баллов набирают менее одного процента участников, что позволяет в подавляющем большинстве случаев избежать ситуации, когда у нескольких абитуриентов одинаковые баллы, и соответственно отобрать наиболее подготовленных. При этом ЕГЭ оценивает исключительно уровень предметной подготовленности. Он является «термометром», который точно показывает то, для измерения чего был сделан. За рамками остается уровень мотивации, психологической устойчивости и много других компонентов, необходимых для успешного обучения. Но это особенность сложившейся за много лет практики приема в вузы, а не недостаток Единого государственного экзамена.

## Список использованной литературы

1. URL: <https://obrnadzor.gov.ru/news/rukovoditel-rosobrnadzora-rasskazal-ob-organizaczii-ege-v-2023-godu/> (дата обращения: 18.08.2023).

---

*Илюхин Борис Валентинович – директор центра систем оценки и управления качеством образования, Федеральный институт развития образования, Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации, 119571, г. Москва, вн. тер. г. муниципальный округ Тропарево-Никулино, пр-т. Вернадского, д. 82, стр. 1, e-mail: baruch371@gmail.com.*

### **THE CHOICE OF EXAM SUBJECTS IN THE RUSSIAN FEDERATION RISKS FOR THE SYSTEM OF ENGINEERING PERSONNEL TRAINING**

*The data on the number of participants of the Unified State Exam in various subjects are considered. A quantitative analysis of the dynamics of the choice of subjects for the state final certification was carried out. The results of the analysis indicate the need for additional support for the development of engineering education of schoolchildren.*

**Keywords:** *Unified State Exam, choice of subjects, admission to universities, recruitment problems, educational results.*

*Ilyukhin Boris Valentinovich – Director of the Center for Education Quality Assessment and Management Systems, Federal Institute for Education Development, Russian Academy of National Economy and Public Administration under the President of the Russian Federation, 119571, Moscow, ext. ter., Troparevo-Nikulino Municipal District, ave. Vernadsky, 82, p. 1, e-mail: baruch371@gmail.com.*

Н.П. Сербина

**ОЛИМПИАДНОЕ ДВИЖЕНИЕ ШКОЛЬНИКОВ  
КАК РЕСУРС ПОДГОТОВКИ ИНЖЕНЕРНЫХ КАДРОВ  
НА ОСНОВЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НАУКИ, ОБРАЗОВАНИЯ  
И ПРОИЗВОДСТВА**

*Рассматривается вопрос о привлечении победителей и призеров Всероссийской олимпиады школьников к обучению на инженерных специальностях в региональных высших учебных заведениях.*

**Ключевые слова:** *Всероссийская олимпиада школьников, инженерные специальности, предприятия ОПК*

Вопрос подготовки достаточного количества квалифицированных кадров по естественно-научным и техническим направлениям в Российской Федерации рассматривается как приоритетный для развития экономики. Кроме того, особое внимание на федеральном уровне уделено подготовке конкурентоспособных IT-специалистов для цифровой экономики и предприятий ОПК [1]. Ежегодно в вузах количество бюджетных мест на технические и естественно-научные программы подготовки и специальности увеличивается. Тем не менее фиксируется устойчивое снижение числа выпускников, выбирающих эти направления для продолжения обучения.

Одним из ресурсов подготовки мотивированных выпускников школ, а затем квалифицированных инженерных кадров может служить Всероссийская олимпиада школьников, направленная на выявление одаренных и талантливых обучающихся в системе общего и среднего-профессионального образования.

Всероссийские олимпиады школьников были учреждены в 1964 году приказом об утверждении государственной системы предметных олимпиад школьников [2]. В настоящее время проведение Всероссийской олимпиады школьников (ВсОШ) направлено в том числе на реализацию задачи, поставленной Правительству РФ в указе Президента РФ от 21 июля 2020 г. № 474 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года» [3]: формирование эффективной системы выявления, поддержки и развития способностей и талантов у детей и молодежи, основанной на принципах справедливости, всеобщности и направленной на самоопределение и профессиональную ориентацию всех обучающихся.

ВсОШ наиболее массовое интеллектуальное состязание, которое проводится по 24 предметам в четыре этапа – школьный, муниципальный, региональный, заключительный. Ежегодное число участников этих этапов более 6,5 млн обучающихся 4–11-х классов. С учетом того что один обучающийся может принимать участие в олимпиаде по нескольким предметам, общее число результатов на всех этапах в 2022/23 учебном году составило более 18 миллионов.

Победители и призеры заключительного этапа ВсОШ получают право на зачисление без вступительных испытаний в любой вуз Российской Федерации (общее количество победителей и призеров за последние семь лет составило более 17000, в 2022/23 учебном году – 3058).

Однако стоит отметить, что распределение победителей и призеров заключительного этапа ВсОШ по субъектам Российской Федерации неравномерно, что является первой проблемой. Наибольшее их число сосредоточено в таких субъектах Российской Федерации, как г. Москва, г. Санкт-Петербург, Республика Татарстан, Удмуртская Республика, Республика Мордовия, Чувашская Республика, Вологодская и Кировская области. Во всех других субъектах Российской Федерации доля победителей и призеров заключительного этапа ВсОШ незначительна, что усиливает образовательное неравенство по направлению работы с талантливыми детьми.

Кроме того, среди победителей и призеров заключительного этапа ВсОШ по предметам, необходимым для поступления на инженерные специальности, выпускники которых востребованы на предприятиях ОПК, в основном школьники г. Москвы. Например, по информатике и ИКТ они заняли более 50 % призовых мест, по математике – более 30 %, по физике – более 40 %.

Поскольку большинство победителей и призеров заключительного этапа ВсОШ из регионов поступают в вузы г. Москвы и г. Санкт-Петербурга, регионы не всегда заинтересованы в поддержке движения ВсОШ и привлечении специалистов вузов и предприятий ОПК к работе по выявлению и развитию талантливых детей.

Вторая проблема заключается в том, что большое количество победителей и призеров регионального этапа не попадает на заключительный этап ВсОШ и, как следствие, не получает возможности поучаствовать в олимпиаде и воспользоваться льготами в случае победы. Это более значительное количество участников, которые могли бы пополнить ряды студентов региональных вузов по инженерным специальностям. Необходимо предусмотреть льготы для поступления таких обучающихся (победителей и призеров регионального этапа ВсОШ) в региональные вузы на инженерные специальности, выпускники которых востребованы на предприятиях ОПК.

Говоря о взаимодействии науки, образования и производства, следует сделать акцент на том, что подготовка квалифицированных инженерных кадров начинается не в выпускных классах школ. Как было сказано выше, ВсОШ проводится в четыре этапа – школьный, муниципальный, региональный, заключительный. Особенности школьного и муниципального этапов является то, что задания для них разрабатываются на региональном уровне (учителями школ, методистами институтов повышения квалификации или иными организациями, осуществляющими методическое сопровождение образовательных организаций). Именно на этапе разработки заданий возможно привлечение специалистов вузов, а предприятия ОПЖ должны стать неотъемлемой частью системы профессиональной ориентации школьников.

### Список использованной литературы

1. URL: <https://rg.ru/2022/03/29/eksperty-rasskazali-skolko-rossii-trebuetsia-it-specialistov.html>.

2. Об утверждении Порядка проведения всероссийской олимпиады школьников : Приказ Минпросвещения России от 27.11.2020 № 678 (ред. от 14.02.2022) (Зарегистрировано в Минюсте России 05.03.2021 № 62664).

3. О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года : Указ Президента РФ от 21.07.2020 № 474.

---

*Сербина Наталья Павловна – ст. науч. сотрудник Центра систем оценки и управления качеством образования Федерального института развития образования Российской академии народного хозяйства и государственной службы при президенте России, 119571, г. Москва, пр. Вернадского, д. 82, e-mail: nataschaserbina@gmail.com.*

### **THE OLYMPIC MOVEMENT OF SCHOOLCHILDREN AS A RESOURCE FOR TRAINING ENGINEERING PERSONNEL BASED ON THE INTERACTION OF SCIENCE, EDUCATION AND PRODUCTION**

*The article discusses the issue of attracting winners and prize-winners of the All-Russian Olympiad for schoolchildren to study in engineering specialties in regional higher educational institutions.*

**Keywords:** *All-Russian Olympiad for schoolchildren, engineering specialties, defense industry enterprises*

*Natalya Pavlovna Serbina – senior researcher at the Center for Educational Quality Assessment and Management Systems, Federal Institute for Educational Development of the Russian Academy of National Economy and Public Administration under the President of Russia, 119571, Moscow, Vernadsky Prospekt, 82, e-mail: nataschaserbina@gmail.com.*

Р.Р. Мубаракшина

## ПОДГОТОВКА ИНЖЕНЕРНЫХ КАДРОВ В СОВРЕМЕННЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ТРАЕКТОРИЯХ

*Рассматривается актуальность подготовки инженерных кадров для развития науки, технологий и экономики. Отмечается необходимость пересмотра традиционных методов обучения и использования новых подходов, а также значимость практической работы – стажировок или прохождения практики в лабораториях, на предприятиях или в организациях для получения опыта и знакомства с процессами разработки продуктов.*

**Ключевые слова:** инженерные кадры, образование, подготовка, инновационные технологии

Сегодняшний мир стремительно меняется, и мы сталкиваемся с быстрым развитием новых технологий и инновационных решений. Инженеры играют ключевую роль в создании новых технологий, поэтому необходимо грамотно подготавливать инженерные кадры. Развитие науки и технологий привело к появлению новых отраслей экономики и высокотехнологичных производств. Для их успешного функционирования необходимы специалисты с соответствующим уровнем знаний и навыков [1].

Мировые тренды показывают растущее значение цифровой экономики, которая основана на использовании информационных технологий. Это приводит к повышению спроса на высококвалифицированных IT-специалистов и инженеров. Также стоит отметить, что подготовленные инженерные кадры являются ключевыми фигурантами при создании новых продуктов или услуг. Без хорошо обученных специалистов нет возможности эффективно конкурировать на международной арене [2].

Подготовка инженерных кадров – это процесс обучения студентов и молодых специалистов основам технической науки, развития необходимых навыков и умений в решении сложных инженерных задач. Она включает в себя изучение фундаментальной теории, получение практических знаний и опыта работы с использованием новейших технологий, а также подготовку к работе в команде и выполнению комплексных проектов. Подготовка инженерных кадров является базовым элементом для создания эффективной промышленности и социально-экономического развития страны [3].

Традиционные методы обучения уже не могут полностью соответствовать требованиям нашего времени. Большинство учебных заведений все еще используют устаревшие программы и методы преподавания, которые не отражают актуальную картину мира и требующиеся навыки. Кроме того, очень часто профессора имеют определенный багаж знаний, который может быть ограничивающим для студентов. В результате выпускники получают недостаточное количество практических знаний и умений.

Нужна ли перезагрузка? Чтобы эффективно подготавливать инженерные кадры, необходимо переосмыслить современные образовательные траектории. Важно учитывать реальный опыт и потребности студентов, а также использовать новые методы обучения.

Одним из наиболее эффективных способов подготовки инженерных кадров является сочетание обучения в традиционном вузе и онлайн-курсов. Онлайн-курсы могут предоставить дополнительную практическую информацию, которой не хватает в университетских программах.

Современные методы подготовки инженерных кадров включают в себя широкий спектр форм обучения и практической работы с использованием новейших технологий и инноваций. Среди них можно выделить следующие [4].

- Интерактивные онлайн-курсы, которые позволяют студентам изучать теоретический материал на своем уровне и по своим потребностям.
- Обучение с использованием компьютерной графики, моделирования 3D-объектов и виртуальной реальности для создания тренировочных программ.
- Программы стажировок или прохождения практики в лабораториях, на предприятиях или в организациях для получения опыта работы и знакомства с процессами разработки продуктов.
- Работа над реальными проектами в командном формате для развития коллективного мышления и сотрудничества.

Кроме того, многие университеты активно привлекают студентов к работе над конкретными научными задачами через решение бизнес-кейсов. Это помогает студентам приобрести необходимый опыт для реальной работы в инженерных отраслях.

Также стоит отметить, что современные методы подготовки инженерных кадров ориентированы на обучение навыкам поиска и анализа информации, командной работе и на развитие лидерских качеств. Это позволяет выпускникам успешно применять свои знания в любых условиях и быть готовыми к быстрому изменению требований рынка труда [5].

Подготовка инженерных кадров является важным фактором для развития государства, университетов и людей. Государство нуждается в компетентном техническом персонале для решения сложных задач

в области энергетики, машиностроения, информационных технологий и других отраслей. Университеты играют ключевую роль в подготовке высококвалифицированных специалистов. Образовательные программы должны соответствовать современным требованиям рынка труда и ориентироваться на новые технологии. Это поможет выпускникам успешно адаптироваться к меняющимся условиям профессиональной деятельности. Для людей инженерная профессия может стать интересным и перспективным выбором жизненного пути. Она предоставляет возможности для саморазвития, достижения успеха и создания новых технологий, которые могут изменить мир к лучшему.

Все участники этого процесса – государство, университеты и люди – должны работать вместе для обеспечения высокой квалификации инженерных кадров.

В целом мы должны стремиться к созданию более эффективной системы подготовки инженерных кадров. Это включает использование новых методов обучения, большей практической работы и взаимодействия университетов и компаний. Только так мы сможем гарантировать, что наши инженеры будут способны решать сложные задачи и развиваться в соответствии с быстро меняющимися требованиями рынка.

### Список использованной литературы

1. Нидергаус Е.О. Подготовка инженерных кадров в современных образовательных траекториях // Новые образовательные технологии в вузе : сб. ст. междунар. науч.-метод. конф. «EDCRUNCH Ural: новые образовательные технологии в вузе – 2017»: Электронное научное издание, Екатеринбург, 25–27 апреля 2017 года / Министерство образования и науки Российской Федерации, ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина». Екатеринбург : Уральский федеральный ун-т им. первого Президента России Б.Н. Ельцина. 2017. С. 377–382.

2. Система подготовки инженерных кадров в современной России: образовательные траектории и контроль качества / А.Н. Данилов, М.Б. Гитман, В.Ю. Столбов [и др.] // Высшее образование в России. 2018. Т. 27, № 3. С. 5–15.

3. Тюхов И.И., Шахраманьян М.А. Возможности профильного и онлайн-образования для построения успешной карьеры в научно-технических сферах // Инновации в сельском хозяйстве. 2016. № 5(20). С. 76–82.

4. Каверзнева Т.Т., Скрипник И.Л., Ксенофонтов Ю.Г. Инновационное направление подготовки высококвалифицированных кадров

инженерно-технического профиля // Учитель создает нацию : сб. материалов V междунар. науч.-практ. конф., Грозный, 25 ноября 2020 года. Махачкала – Грозный : АЛЕФ. 2020. С. 63–66.

5. Найденов А.С., Найденова А.А. Моделирование процесса воспроизводства инженерных кадров // Теория и практика общественного развития. 2018. № 5(123). С. 110–116.

---

*Мубаракшина Рузиля Радиковна – студентка 4-го курса, ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», г. Казань, ул. Красносельская, д. 51, e-mail: ruzilya.mubarakshina.01@mail.ru.*

### **TRAINING OF ENGINEERING STAFF IN MODERN EDUCATIONAL TRAJECTORIES**

*This article examines the relevance and importance of training engineering personnel for the development of science, technology and the economy. She points to the need to revise traditional teaching methods and use new approaches. The importance of practical work through internship programs or internships in laboratories, enterprises or organizations to gain work experience and familiarize yourself with product development processes is also noted. In general, the article calls for the creation of a more effective system for training engineering personnel, taking into account the needs of the labor market.*

**Keywords:** *engineering personnel, education, training, innovative technologies*

*Mubarakshina Ruzilya Radikovna – 4th year student, Kazan State Power Engineering University, Kazan, st. Krasnoselskaya, 51, e-mail: ruzilya.mubarakshina.01@mail.ru.*

## СОДЕРЖАНИЕ

### Секция 1. РАДИОФИЗИКА И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

*Красненко Н.П., Рыбаков И.А.*

ПРОБЛЕМЫ И ВОЗМОЖНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ  
БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ.....5

*Красненко Н.П., Богусевич А.Я., Кураков С.А., Раков А.С.,  
Рыбаков И.А.*

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕМАСКИРУЮЩИХ ПРИЗНАКОВ  
ПРИ ПОЛЕТЕ КВАДРОКОПТЕРОВ ДЛЯ ИХ ОБНАРУЖЕНИЯ ..... 15

*Власов С.В., Павлов Н.С., Жечев Е.С.*

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ  
СИГНАЛА В СВЯЗАННОЙ МИКРОПОЛОСКОВОЙ ЛИНИИ ..... 22

*Усков Г.К., Нескородов С.Е., Кондратьев Д.П., Болгов А.Ю.*

ИССЛЕДОВАНИЕ ФРАКТАЛЬНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ..... 27

*Лосев Д.В., Бардашов Д.С., Быков А.Г.*

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН  
В НЕЛИНЕЙНЫХ СРЕДАХ С УЧЕТОМ ВЕКТОРНОЙ  
СТРУКТУРЫ ПОЛЯ ..... 31

*Гогадзе И.С.*

ВОССТАНОВЛЕНИЕ И ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ВЛАЖНОСТИ  
АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА С ПОМОЩЬЮ ЗЕНИТНОЙ  
ТРОПОСФЕРНОЙ ЗАДЕРЖКИ ПРИ ПРОСТРАНСТВЕННОМ  
РАЗНЕСЕНИИ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ И НАВИГАЦИОННОЙ  
СТАНЦИЙ ..... 37

*Аржевикин И.В.*

АЛГОРИТМ КОМБИНИРОВАННОГО ТИПА ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ  
СВОБОДНЫХ УЧАСТКОВ РАДИОДИАПАЗОНА ПРИ РАБОТЕ  
В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ ..... 40

### Секция 2. РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

*Лянгузов Д.А.*

ИССЛЕДОВАНИЕ ВХОДНОГО ИМПЕДАНСА НИЗКОПРОФИЛЬНОЙ  
АНТЕННЫ ..... 50

*Зайков К.Д., Аникин А.С.*

АНТЕННАЯ СИСТЕМА МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА  
ТИПА SUBESAT ..... 54

*Сальников Д.В., Францишко А.Е.*

СПОСОБ РАСШИРЕНИЯ СПЕКТРА НАВИГАЦИОННЫХ  
РАДИОСИГНАЛОВ СПУТНИКОВЫХ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ  
СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ОСОБЕННОСТЕЙ МЕАНДРОВОЙ  
ПОДНЕСУЩЕЙ МОДУЛЯЦИИ..... 58

*Воронов М.А., Воронов С.М.*

РЕГИОНАЛЬНЫЕ СЕТИ НАЗЕМНЫХ ИСТОЧНИКОВ  
НАВИГАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ КАК РЕЗЕРВ ГЛОНАСС..... 67

<i>Пустошилов А.С., Царев С.П.</i>	
СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ SPARSE RECOVERY ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ РАЗРЫВОВ В ФАЗОВЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ ОДНОЧАСТОТНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ ПРИЕМНИКОВ .....	72
<i>Тяпкин П.С., Важенин Н.А., Плохих А.П.</i>	
АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДОВ СЛЕПОГО РАЗДЕЛЕНИЯ СИГНАЛОВ ДЛЯ БОРЬБЫ С ПОМЕХОВЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В СИСТЕМАХ КОСМИЧЕСКОЙ СВЯЗИ .....	77
<i>Бадмаев А.Ю., Дуров И.Н., Размыслов Р.А., Тимофеев И.И.</i>	
ЭНЕРГОПРЕОБРАЗУЮЩАЯ АППАРАТУРА ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ.....	81
<i>Пушкарев Т.Н.</i>	
ОБНАРУЖЕНИЕ МАЛОРАЗМЕРНЫХ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ .....	84
<i>Калашников Г.А., Зайков Д.Д.</i>	
ДЕКОДЕР ВИТЕРБИ ДЛЯ СИСТЕМЫ СВЯЗИ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА .....	89
<i>Зайков Д.Д., Калашников Г.А.</i>	
АНАЛИЗ МЕТОДОВ КРИПТОГРАФИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ КАНАЛА СВЯЗИ МЕЖДУ БЕСПИЛОТНЫМ ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТОМ И НАЗЕМНЫМ ПУНКТОМ УПРАВЛЕНИЯ .....	93
<i>Зайков Д.Д., Калашников Г.А., Зайков К.Д.</i>	
МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ ПО РАБОТЕ С РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИЕЙ «РЕКА» .....	98
<i>Никишкин М.С., Корягин А.Н., Турнаева М.А.</i>	
ЦИФРОВОЕ УМНОЖЕНИЕ СИГНАЛА .....	104
<i>Полянских П.А., Денисов В.П., Мещеряков А.А.</i>	
ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ДАЛЬНОСТИ ДО ИСТОЧНИКА РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ПАССИВНОЙ ОДНОПОЗИЦИОННОЙ СИСТЕМОЙ .....	109
<b>Секция 3. СЕТИ И СИСТЕМЫ СВЯЗИ</b>	
<i>Акельев Е.С., Демин А.А.</i>	
ОРГАНИЗАЦИЯ БЕЗОПАСНОГО УДАЛЕННОГО ДОСТУПА ПРИ ПОМОЩИ ВИРТУАЛЬНОЙ ЧАСТНОЙ СЕТИ ДЛЯ РАБОТЫ IT-БИЗНЕСА В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ ЦИФРОВИЗАЦИИ ФИНАНСОВО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ .....	116
<i>Мищенко И.Б., Косьянчук В.В., Зыбин Е.Ю., Леликов М.А., Платошин Г.А.</i>	
ПОСТРОЕНИЕ КИБЕРЗАЩИЩЕННОЙ БОРТОВОЙ ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ ВОЗДУШНОГО СУДНА .....	124
<i>Мелихов С.В.</i>	
О ПРИНЦИПЕ ВЗАИМНОСТИ ДЛЯ АНТЕННЫ «ЗАЗЕМЛЕННЫЙ ВИБРАТОР» .....	129

*Рогожников Е.В., Кондрашов Д.А., Коновальчиков А.В.,  
Диноченко К.В.*

ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ КОРРЕКТНОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ  
5G NR В СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМАХ СВЯЗИ ..... 136

*Аверина Л.И., Гутерман Н.Е.*

МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ ДЛЯ АППРОКСИМАЦИИ МАКСИМАЛЬНО  
ПРАВДОПОДОБНОГО АЛГОРИТМА ДЕМОДУЛЯЦИИ СИГНАЛОВ  
СТАНДАРТА DVB-S2 ..... 147

*Якушевич Г.Н.*

АЛГОРИТМ СИНТЕЗА И АНАЛИЗА ВОСЬМИПОЛЮСНИКОВ  
НАПРАВЛЕННЫХ ОТВЕТВИТЕЛЕЙ НА СВЯЗАННЫХ  
ПОЛОСКОВЫХ ЛИНИЯХ ПЕРЕДАЧИ ..... 151

*Каширский Д.Е., Калачев Е.А.*

РЕАЛИЗАЦИЯ ОСНОВАННОГО НА МАТРИЦЕ ТЁПЛИЦА  
УСИЛЕНИЯ СЕКРЕТНОСТИ В LABVIEW ..... 158

*Голиков А.М., Куранов А.А., Скурихин Д.В., Дернова А.С.*

ТЕХНОЛОГИЯ LoRaWAN IoT ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ  
И НАЗЕМНЫХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ  
ИНФОРМАЦИИ ..... 164

#### **Секция 4. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ**

*Ноздреватых Б.Ф., Ноздреватых Д.О., Куприц В.Ю., Вебер В.И.*

АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПЛАТФОРМ  
ДЛЯ СОЗДАНИЯ СИСТЕМ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ..... 171

*Куприц В.Ю., Светличный Ю.А., Дацюк В.В., Вебер В.И.*

СТРУКТУРА ПРОГРАММНО-АППАРАТНОЙ ПЛАТФОРМЫ  
АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ  
ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ..... 178

*Усанов В.В., Скитович А.С., Вебер В.И., Куприц В.Ю.*

СОЗДАНИЕ WEB-ИНТЕРФЕЙСА ДЛЯ ПЛАТФОРМЫ  
ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ..... 184

*Нетесов А.А., Эрин Ф.А., Вебер В.И., Куприц В.Ю.*

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ С МИКРОКОМПЬЮТЕРАМИ  
НА БАЗЕ НЕЙРОННЫХ ПРОЦЕССОРОВ ..... 191

*Бахтина В.А.*

НЕЙРОСЕТЕВАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЯ  
МЫШЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОМИОГРАФИИ .... 197

*Чирьев Е.А., Немчинов А.И., Гнеушев Р.А.*

СРАВНЕНИЕ РАЗРАБОТКИ ЧАТ-БОТОВ В РАЗЛИЧНЫХ  
МЕССЕНДЖЕРАХ ..... 202

*Алымкулова А.К., Лобода Ю.О., Бирюкова Н.С.*

РАЗРАБОТКА ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ «ИЗМЕРЕНИЕ  
УРОВНЯ СТРЕССА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
НЕЙРОИНТЕРФЕЙСА» ..... 207

<i>Коваль Н.А.</i>	
СПОСОБ ОЦЕНКИ ДОПЛЕРОВСКОЙ ЧАСТОТЫ ЦЕЛИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ УВОДЯЩЕЙ ПОМЕХИ ПО СКОРОСТИ С КВАДРАТИЧНЫМ ЗАКОНОМ УВОДА.....	212
<i>Кузьменко Д.Е., Кайда А.Ю.</i>	
ПОТОКОВАЯ АСИНХРОННАЯ ПЕРЕДАЧА ДАННЫХ МЕЖДУ МОДУЛЯМИ В ETL-КОНВЕЙЕРЕ .....	216
<i>Аришина М.С., Таушканов А.С.</i>	
АВТОМАТИЗАЦИЯ ПОДБОРА ДИЗАЙНА ИНТЕРНЕТ-САЙТОВ .....	219
<b>Секция 5. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВУЗОВ С ПРЕДПРИЯТИЯМИ ОПК</b>	
<i>Турилова М.В., Кравцов К.С.</i>	
РАЗВИТИЕ НАВЫКОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ У ДЕТЕЙ .....	224
<i>Артемов И.Л.</i>	
ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ШИРОКОПОЛОСНОГО РАДАРА В ОБУЧЕНИИ СТУДЕНТОВ КАФЕДРЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ И ПРОИЗВОДСТВА РАДИОАППАРАТУРЫ .....	228
<i>Страхов С.Ю., Сотникова Н.В., Балашов В.М.</i>	
ОСОБЕННОСТИ СКВОЗНОЙ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ ДЛЯ ПРЕДПРИЯТИЙ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО РЕГИОНА РФ.....	232
<i>Илюхин Б.В.</i>	
ВЫБОР ПРЕДМЕТОВ ЕГЭ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ – РИСКИ ДЛЯ СИСТЕМЫ ПОДГОТОВКИ ИНЖЕНЕРНЫХ КАДРОВ .....	239
<i>Сербина Н.П.</i>	
ОЛИМПИАДНОЕ ДВИЖЕНИЕ ШКОЛЬНИКОВ КАК РЕСУРС ПОДГОТОВКИ ИНЖЕНЕРНЫХ КАДРОВ НА ОСНОВЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НАУКИ, ОБРАЗОВАНИЯ И ПРОИЗВОДСТВА .....	243
<i>Мубаракшина Р.Р.</i>	
ПОДГОТОВКА ИНЖЕНЕРНЫХ КАДРОВ В СОВРЕМЕННЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ТРАЕКТОРИЯХ .....	246

**НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ**

**ШАРЫГИНСКИЕ ЧТЕНИЯ**

**Пятая международная научная конференция ведущих научных школ  
в области радиолокации, радионавигации и радиоэлектронных систем передачи  
информации, посвященная памяти профессора Томского государственного  
университета систем управления и радиоэлектроники  
академика Германа Сергеевича Шарыгина**

Материалы конференции

Подписано в печать 25.12.2023. Формат 70×100 1/16.  
Усл. печ. л. 20,64. Тираж 50 экз. Заказ 308.

---

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники»

634050, г. Томск, пр. Ленина, 40.  
Тел. (3822) 533018.