

# **DSPA:**

## **Вопросы применения цифровой обработки сигналов**

**№2**

**2026**



## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Портнов Н.С., Панков К.Н.</b> <b>ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЗАЩИТЫ ПЕРСОНАЛЬНЫХ ДАННЫХ В СИСТЕМАХ УМНОГО ДОМА С ПРИМЕНЕНИЕМ КРИПТОГРАФИЧЕСКИХ МЕТОДОВ</b>	<b>4</b>
<b>Бирюков Н.А., Синева И.С.</b> <b>ПОСТРОЕНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ МОДЕЛИ СТАТИСТИЧЕСКОГО АРБИТРАЖА НА ОСНОВЕ КОИНТЕГРАЦИОННЫХ СООТНОШЕНИЙ</b>	<b>11</b>
<b>Елисеев С.Н.</b> <b>MFSK-OFDM МОДЕМ ДЛЯ УЗКОПОЛОСНЫХ РАДИОКАНАЛОВ</b>	<b>20</b>
<b>Панкратов Д.Ю., Фарах А.М.</b> <b>VISIBLE LIGHT COMMUNICATION (VLC): СВЯЗЬ С ПОМОЩЬЮ ВИДИМОГО СВЕТА</b>	<b>28</b>
<b>Рулев Д.В., Гадасин Д.В., Савин В.А., Косенок И.И.</b> <b>АЛГОРИТМ ВОССТАНОВЛЕНИЯ БИНАРНОГО ДЕРЕВА ИСХОДЯ ИЗ КОЛИЧЕСТВА И ВЕСА ЛИСТОВЫХ ВЕРШИН</b>	<b>37</b>
<b>Ермакова А.В., Сенин И.А., Илюхин А.А., Любчиков Р.И.</b> <b>СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СЛОТОВОЙ СТРУКТУРЫ URLLC И EMBB С РЕЗЕРВИРОВАНИЕМ ПАКЕТОВ В АРХИТЕКТУРЕ 5G ADVANCED</b>	<b>46</b>

# ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЗАЩИТЫ ПЕРСОНАЛЬНЫХ ДАННЫХ В СИСТЕМАХ УМНОГО ДОМА С ПРИМЕНЕНИЕМ КРИПТОГРАФИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

**Портнов Никита Сергеевич**

*Московский технический университет связи и информатики,  
студент, магистрант, Москва, Россия*  
[portnovn@list.ru](mailto:portnovn@list.ru)

**Панков Константин Николаевич**

*Московский технический университет связи и информатики, доцент, к.ф.-м.н., Москва, Россия*  
[pankov\\_kn@mtuci.ru](mailto:pankov_kn@mtuci.ru)

## **Аннотация**

*В данной работе рассмотрен практический подход к защите персональных данных в системах умного дома и ИИТ с учётом ограниченных ресурсов IoT-устройств и риска деанонимизации по метаданным. Предложена модель архитектуры с рациональным распределением функций безопасности между полевыми устройствами и шлюзом/edge-уровнем. Сформулированы требования к защищённому обмену по принципу «шифрование + аутентификация + анти-geplay» и показана необходимость комплексного применения конфиденциальности, целостности, подлинности и управляемости ключей. Рассмотрены потоковые схемы (на примере XOR-гаммирования) и зафиксированы условия их корректного использования, включая уникальность поппсе/счётчика и стойкость генерации гаммы. Описаны структуры защищённых сообщений телеметрии и команд управления, а также базовая политика ротации ключей, хранения счётчиков и процедур ресинхронизации/отзыва.*

## **Ключевые слова:**

*умный дом, промышленный интернет вещей, персональные данные, информационная безопасность, легковесная криптография, потоковое шифрование, XOR-гаммирование, управление ключами.*

## **Введение**

В современных условиях системы умного дома и «умных зданий» накапливают массивы сведений, которые позволяют реконструировать поведенческие паттерны человека: фиксацию присутствия, журналы доступа, параметры среды, действия в приложениях управления, а также видеопотоки и сопутствующие метаданные, что уже отмечалось в [1]. В промышленном контуре (предприятия, заводы, инфраструктурные объекты) этот набор расширяется данными о перемещениях персонала между зонами, применении пропусков и/или биометрических идентификаторов, действиях операторов и корреляциях «человек - технологическая зона». В результате возрастает привлекательность информации для нарушителя и увеличивается потенциальный ущерб при компрометации. Наиболее распространённые сценарии нарушений обусловлены ошибками конфигурирования, недостаточно надёжной аутентификацией, уязвимостями прошивок и использованием небезопасных каналов связи; при высокой неоднородности IoT/ИИТ-устройств это осложняет выработку и соблюдение единых требований безопасности [2, 3].

Для предприятий проблема усугубляется интеграцией IoT/ИИТ-устройств с системами диспетчеризации и промышленными протоколами, тогда как приоритет доступности и непрерывности технологического процесса сужает перечень допустимых мер защиты и требует предсказуемости задержек. Поэтому практическая значимость смещается к организации защищённого обмена, в рамках которого криптографические механизмы обеспечивают конфиденциальность и целостность данных без избыточной вычислительной нагрузки на конечные устройства, а управление ключами и контроль политик распределяются по уровням архитектуры [4].

Цель данного исследования — обосновать практический подход к защите персональных данных в системах умного дома при ограниченных ресурсах IoT-устройств, сформулировав требования к защищённому обмену данными на основе связки «шифрование + аутентификация + анти-geplay», включая условия корректного применения потоковых схем (XOR) и рациональное распределение функций безопасности между устройствами и шлюзом/edge-уровнем.

## **Компоненты систем умного дома и киберфизических инфраструктур и требования к защите данных**

Системы умного дома и близкие к ним киберфизические инфраструктуры предприятия (ПоТ/умные здания) целесообразно описывать как многоуровневую архитектуру: данные возникают на периферии, затем агрегируются локально и после этого передаются в сервисный контур. При переносе подходов из бытового сегмента в промышленный меняются масштаб, регламентация и акцент на доступности, однако базовый набор компонентов и характер потоков данных в целом остаются прежними [4].

Уязвимости и угрозы для таких систем, в том числе, обусловлены неоднородностью устройств, длительным жизненным циклом и ошибками конфигурации [5]. В структурном отношении можно выделить следующие компоненты:

1. Конечные устройства (датчики, камеры, контроллеры доступа, исполнительные механизмы);
2. Шлюз/edge-узел (локальный контроллер, промышленный шлюз), выполняющий агрегацию, маршрутизацию и функции безопасности;
3. Клиентские средства управления (мобильные приложения, рабочие места диспетчера/оператора);
4. Сервисный контур (локальные серверы/облако) для хранения, аналитики и мониторинга.

В контексте защиты персональных данных принципиально важно, что даже «техническая» телеметрия и журналы событий могут являться персональными данными либо приводить к деанонимизации при корреляции. К таким данным относятся события присутствия и доступа (СКУД), траектории перемещений по зонам, идентификаторы устройств/учётных записей, временные метки, а также видеопотоки и связанные метаданные [5, 6]. В промышленной среде эти сведения нередко дополняются связкой с технологическими зонами и ролями персонала, что увеличивает потенциальный ущерб при компрометации [7].

С учётом указанной структуры требования к защите данных целесообразно задавать через совокупность свойств:

- конфиденциальность (исключение раскрытия содержимого и чувствительных метаданных);
- целостность (предотвращение подмены данных и команд управления);
- подлинность (аутентификация устройства и источника команд);
- устойчивость к повтору сообщений (защита от воспроизведения ранее записанных событий/команд);
- управляемость (жизненный цикл ключей: выпуск, ротация, отзыв; безопасное переподключение устройства);
- локализация ущерба (компрометация одного узла не должна раскрывать всю систему; на предприятии — дополнительно разграничение по зонам и подсистемам).

Исходя из совокупности свойств мы видим, что необходимо использовать криптографические методы защиты информации [8-10]. Компонентная модель напрямую задаёт необходимость распределять защитные функции: конечные устройства выполняют минимально достаточные криптографические операции, тогда как управление ключами, контроль политик и журналирование рационально сосредоточивать на шлюзе/edge-уровне, что особенно важно для промышленного контура с требованиями к предсказуемости и непрерывности функционирования [11].

### **Криптографические механизмы для устройств с ограниченными ресурсами**

Криптографическая защита в IoT/ПоТ-средах должна проектироваться с учётом ограничений полевого уровня: небольшого объёма памяти, низкой вычислительной мощности, лимитов энергопотребления и требований к предсказуемости задержек (особенно в промышленном контуре). В таких условиях наиболее обоснованным является распределение защитных функций по уровням архитектуры: «лёгкие» (требующие малых ресурсов системы) операции выполняются на конечном устройстве, тогда как более ресурсоёмкие выносятся на шлюз/edge-узел. В качестве одного из практических инструментов рассматриваются подходы низкоресурсной (см. [12-14]) криптографии, позволяющие сохранить приемлемую стойкость при снижении ресурсной стоимости реализации [11].

Рассмотрим распределение криптографических функций. На конечных устройствах целесообразно опираться преимущественно на симметрические механизмы, поскольку по вычислительным затратам они обычно существенно «дешевле» асимметрических [13]. Асимметрическая криптография и инфраструктурные операции (установление первичного доверия, выпуск параметров защищённого обмена) рациональнее выполнять на шлюзе либо ограничивать их однократным применением при первичной регистрации устройства [15]. После этого устройство функционирует на симметричных ключах в рамках заданной политики (ротация, отзыв, ограничение области действия ключа). Для практической защиты персональных данных в умных зданиях и IoT требуется обеспечить:

1. Конфиденциальность телеметрии/событий (шифрование);
2. Целостность и подлинность сообщений (имитовставка/MAC или AEAD), поскольку подмена команд управления может приводить к более тяжёлым последствиям, чем чтение данных;
3. Защита от повторов (счётчик/nonce);
4. Управляемость ключей (хранение, ротация, отзыв).

При выборе конкретной схемы следует ориентироваться не только на формальную стойкость, но и на измеримые критерии применимости: длину и частоту сообщений, допустимую задержку обработки, а также совокупную стоимость связки «шифрование + аутентификация». В исследованиях по оценке производительности криптографических методов для IoT подчёркивается, что механизмы необходимо анализировать в комплексе, поскольку одно лишь шифрование без контроля целостности не обеспечивает требуемой защиты в реальной модели угроз [11, 15].

С учётом указанных ограничений в системах умного дома и IoT наиболее широко применяются поточные режимы шифрования (режим счетчика) для телеметрии малого объёма, а также схемы класса AEAD либо композиция Encrypt-then-MAC, которые в рамках единого протокола обмена обеспечивают конфиденциальность и контроль целостности/подлинности.

### Применение потоковых схем шифрования в ресурсно-ограниченных устройствах

Потоковые схемы шифрования получили широкое распространение в ресурсно-ограниченных IoT/IoT-устройствах, поскольку обеспечивают линейную трудоёмкость обработки и предсказуемые задержки при передаче телеметрии небольшого объёма. В работе рассматривается общий принцип потокового шифрования, а в качестве иллюстративного механизма используется XOR-гаммирование как частный случай, позволяющий наглядно зафиксировать требования к уникальности параметров синхронизации (nonce/счётчик) и к качеству генерации гаммы [16].

Базовое соотношение потокового шифрования может быть представлено следующим образом:

$$C = P \oplus \Gamma(K, nonce, ctr), \quad (1)$$

где:

$P$  – открытый текст (исходные данные датчика или команда),

$C$  – шифртекст (передаваемое по сети представление данных),

$\oplus$  – операция XOR;

$K$  – секретный ключ, общий для отправителя и получателя; **nonce** - одноразовый параметр, предназначенный для исключения повторов;

**ctrctr** – счётчик (монотонно изменяемый параметр синхронизации, часто используемый вместо **nonce** или совместно с ним);

$\Gamma$  – функция генерации гаммы (псевдослучайной ключевой последовательности), которая детерминированно формируется из  $KK$  и параметров **nonce/ctrnonce/ctr**, чтобы получатель мог воспроизвести ту же гамму и выполнить обратное преобразование [17].

После введения данного соотношения принципиальным становится не сама операция XOR, а корректность параметров синхронизации и свойств гаммы. Для потоковых схем критичны два аспекта:

– уникальность **nonce** и/или **ctrctr** для каждого сообщения (исключение повторного использования гаммы);

– криптографическая стойкость генерации гаммы, исключающая восстановление  $\Gamma$  по наблюдаемому трафику. При нарушении уникальности возникает соотношение:

$$C_1 \oplus C_2 = P_1 \oplus P_2, \quad (2)$$

которое при структурированной телеметрии и типовых командах часто позволяет восстановить исходные данные [13, 16]. Поэтому в рассматриваемых системах необходимо фиксировать правила хранения счётчика (в энергонезависимой памяти), алгоритм ресинхронизации после сбоя, а также обязательность аутентификации сообщений (MAC/AEAD), без которой подмена возможна даже без раскрытия содержимого.

### Формирование защищённого сообщения телеметрии

В системах умного дома и IoT основная доля трафика приходится на короткие сообщения телеметрии и событий. Поэтому защищённый обмен целесообразно описывать не в общем виде («шифрование + контроль целостности»), а через формализованную структуру сообщения: какие поля присутствуют, что подлежит шифрованию, какие элементы включаются в контроль целостности и какие параметры отвечают за синхронизацию поточной схемы [18-21]. Такой уровень формализации уменьшает вероятность ошибок при интеграции (например, применение шифрования без проверки подлинности или неверное использование nonce/счётчика) и обеспечивает воспроизводимость реализации на различных устройствах. Рассматривается структура сообщения, передаваемого от устройства на шлюз/edge-узел:

- $Header = DevID || Type || Ctr || TS$
- $Payload = Data$
- $Gamma = \Gamma(Kenc, nonce=Ctr)$
- $Cipher = Payload XOR Gamma$
- $Tag = MAC(Kmac, Header || Cipher)$

где:

**Header** – формирует «контекст» сообщения: DevID нужен, чтобы шлюз однозначно связал сообщение с источником и выбрал правильные ключи/политику проверки (окно счётчика, допустимые типы сообщений, частота ротации ключей). Type необходим для различия типа сообщения (телеметрия, алерт и т.д.). Ctr выполняет две функции, первая служит параметром синхронизации потоковой схемы (через него генерируется гамма), вторая позволяет отбрасывать повторы (replay), если злоумышленник воспроизводит ранее записанное сообщение (Ctr не должен повторяться в рамках одного ключа шифрования для устойчивой безопасности). TS используется для журналирования, корреляции событий и анализа аномалий (например, внезапный поток сообщений в нехарактерное время).

**Payload** – данные датчика/события (значение температуры, факт открытия двери, код тревоги и т.д.). Именно этот блок несёт основную ценность (в том числе персональные данные или признаки, позволяющие их восстановить)

**Gamma** – генерируется детерминированно из Kenc и Ctr (или nonce), поэтому получатель может получить ту же гамму и расшифровать сообщение.

**Cipher** – получается, как XOR полезной нагрузки и гаммы, что даёт конфиденциальность при условии стойкой гаммы.

**Tag** – имитовставка, вычисленная на ключе Kmac. Защищает поля контекстного сообщения от подмены и исключает сценарий, когда атакующий не расшифровывает данные, но меняет Type или «перематывает» Ctr, провоцируя неправильную обработку/логирование.

Из этой структуры следует, что проверка корректности сообщения должна выполняться до расшифрования и дальнейшей обработки: часть полей (DevID, Ctr) задаёт выбор ключей и параметров проверки, а Tag подтверждает целостность как заголовка, так и шифртекста. Соответственно, обработка на стороне шлюза/edge-узла должна выполняться в следующем порядке:

- 1.Парсинг Header (извлечение DevID, Type, Ctr, TS).
- 2.Выбор ключей/политик по DevID (получение Kenc, Kmac, правил окна счётчика).
- 3.Проверка Tag: вычислить MAC(Kmac, Header || Cipher) и сравнить с полученным Tag.
  - если MAC не совпал – пакет отклоняется (подмена/ошибка/не тот ключ).
- 4.Проверка Ctr:

- если Ctr уже встречался или выходит за допустимое окно – пакет отклоняется как повтор/аномалия.

5.Расшифрование: воспроизвести  $\text{Gamma} = \Gamma(\text{Kenc}, \text{Ctr})$  и получить  $\text{Payload} = \text{Cipher XOR Gamma}$ .

6.Передача в сервисный контур: хранение/аналитика/реакция (в промышленной среде – с учётом зон и политик).

### Формирование защищённых команд в канале

Команды управления относятся к сообщениям повышенной критичности, поскольку их подмена либо повторное воспроизведение способно привести к физическим последствиям (разблокировка доступа, отключение сигнализации, изменение режима инженерных систем). Поэтому для команд целесообразно применять ту же базовую структуру, что и для телеметрии, но предусмотреть отдельный параметр синхронизации для направления «шлюз – устройство».

Структура команды:

- $\text{Header\_cmd} = \text{DevID} \parallel \text{CmdType} \parallel \text{Ctr\_cmd} \parallel \text{TS\_cmd}$
- $\text{Cipher\_cmd} = \text{CmdPayload XOR } \Gamma(\text{Kenc\_cmd}, \text{Ctr\_cmd})$
- $\text{Tag\_cmd} = \text{MAC}(\text{Kmac\_cmd}, \text{Header\_cmd} \parallel \text{Cipher\_cmd})$
- $\text{Message\_cmd} = \text{Header\_cmd} \parallel \text{Cipher\_cmd} \parallel \text{Tag\_cmd}$

Здесь Ctr\_cmd – монотонный счётчик команд (отдельно от счётчика телеметрии), а ключи могут быть либо отдельными по направлениям (Kenc\_up, Kmac\_up и Kenc\_down, Kmac\_down), либо выводиться из общего секрета с разделением по контексту. Раздельность счётчиков уменьшает риск ошибок синхронизации и упрощает анти-rewplay проверку на устройстве.

Приём команды на устройстве выполняется в последовательности:

1. проверка Tag\_cmd;
2. проверка допустимости Ctr\_cmd (строгий рост или рост в пределах окна);
3. расшифрование и исполнение команды. Исполнение без успешной криптографической валидации исключается.

### Политика управления ключами и параметрами синхронизации

Корректность поточного шифрования в IoT/ПоТ определяется не только выбором криптопримитивов, но и строгой дисциплиной обращения с ключами и синхропараметрами. Поэтому протокол обмена должен содержать минимально достаточную политику управления ключевым материалом и счётчиками [11, 15].

Ротацию рабочих ключей рекомендуется выполнять по времени (например, раз в N дней) и/или по объёму (после N сообщений). Это позволяет ограничить ущерб при компрометации и снижает риск накопления больших массивов данных, защищённых одним ключом.

Что можно сказать о хранении и устойчивости счётчиков? Счётчики Ctr и Ctr\_cmd следует сохранять в энергонезависимой памяти, чтобы исключить их откат после перезагрузки устройства. Если счётчик откатывается при неизменном ключе, возникает риск повторного формирования гаммы, что для потоковой схемы недопустимо [4, 13].

Теперь рассмотрим окно допустимых значений и ресинхронизация. Для учёта потерь пакетов на стороне приёма допустима оконная проверка Ctr (например, принятие сообщений в пределах окна вперёд). При выходе за пределы окна либо при выявлении повторов инициируется процедура ресинхронизации (в простейшем варианте – перевыпуск рабочих ключей и сброс состояния счётчиков в контролируемом режиме) [4].

А теперь рассмотрим реакцию на компрометацию. При обнаружении признаков компрометации устройство переводится в состояние отзыва: шлюз блокирует DevID, прекращает приём/передачу, фиксирует инцидент и запускает повторную регистрацию с перевыпуском ключей. В промышленном контуре целесообразно использовать отдельные ключевые домены по зонам/подсистемам, чтобы отзыв одного устройства не приводил к нарушению работы всего объекта [11].

## Заключение

В статье рассмотрены практические подходы к защите персональных данных в умном доме с учётом ограниченных ресурсов IoT-устройств и рисков компрометации как содержимого, так и метаданных обмена. Показано, что эффективная защита достигается только комплексно: шифрование должно дополняться контролем целостности и подлинности, корректным управлением ключами и механизмами защиты от повторов сообщений.

Отдельно отмечено, что поточные схемы на основе XOR корректны лишь при криптографически стойкой гамме и строгом запрете повторного использования одной и той же гаммы/параметров синхронизации в пределах ключа; иначе возникают прямые предпосылки к раскрытию данных и/или подмене сообщений [13, 22]. В качестве практического вывода сформулирована необходимость строить обмен по принципу «шифрование + аутентификация + анти-replay» и переносить более тяжёлые функции (управление ключами, контроль политик, мониторинг) на шлюз/edge-уровень.

Перспективы дальнейшей работы связаны с переходом к стандартизованным режимам защищённого обмена и экспериментальной проверкой выбранных решений на целевых устройствах по критериям задержек, энергопотребления и устойчивости к сбоям.

## Литература

1. *Панков К. Н., Портнов Н. С.* Защита персональных данных в системах умного дома с применением криптографии // Технологии информационного общества : Сборник трудов XIX Международной отраслевой научно-технической конференции , Москва, 11-13 марта 2025 года. М.: МТУСИ, 2025. С. 146-148.
2. *Зараменских Е. П., Артемьев И. Е.* Интернет вещей: исследования и область применения: монография. М.: ИНФРА-М, 2023. С. 42-58, 96-104.
3. *Pankov K.* Enumeration of Boolean Mapping with Given Cryptographic Properties for Personal Data Protection in Blockchain Data Storage // Conference of Open Innovations Association, FRUCT. 2019. No. 24, pp. 300-306. DOI 10.23919/FRUCT.2019.8711894.
4. *Ощепков Н. В., Кротова Е. Л.* Анализ методов противодействия угрозам для промышленного интернета вещей // Международный научно-исследовательский журнал. 2024. № 7(145). DOI 10.60797/IRJ.2024.145.14.
5. *Белоус А. И., Солодуха В. А.* Основы кибербезопасности: стандарты, концепции, методы и средства обеспечения. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2021. С. 214-229, 312-320.
6. *Вяткин И. П.* Безопасность SCADA-систем в условиях облачных технологий // Вестник науки. 2024. Т. 4, № 5(74). С. 1365-1372.
7. *Вольвач А. В., Поддубная Н. С.* Уязвимости системы "Умный дом" // Вестник Пермского университета. Математика. Механика. Информатика. 2021. № 1(52). С. 49-52.
8. *Панков К. Н.* Использование криптографических средств для обеспечения анонимности в информационно-телекоммуникационных сетях на примере tor // Технологии информационного общества : XI Международная отраслевая научно-техническая конференция: сборник трудов, Москва, 15-16 марта 2017 года. М.: Издательский дом Медиа Паблшер, 2017. С. 283-284. EDN ZCXATF
9. *Панков К. Н.* Использование криптографических средств для сквозных цифровых технологий на примере систем распределенного реестра // Технологии информационного общества : Материалы XII Международной отраслевой научно-технической конференции, Москва, 14-15 марта 2018 года. Том 1. М.: Издательский дом Медиа Паблшер, 2018. С. 365-366. EDN UUNHSM
10. *Пеев Д. Д., Панков К. Н., Власов А. В.* Защита каналов управления беспилотных летательных аппаратов криптографическими методами // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2023. Т. 14, № 4. С. 33-43.
11. *Постолатьев Н. В.* Исследование методов шифрования и аутентификации, пригодных для использования в ИОТ, с измерением их производительности // Вестник науки. 2025. Т. 1, № 6(87). С. 248-255.
12. *Панков К. Н.* Основные блочные алгоритмы шифрования, предназначенные для обеспечения информационной безопасности в системе интернет-вещей // Технологии информационного общества : Материалы XIII Международной отраслевой научно-технической конференции, Москва, 20-21 марта 2019 года. Том 1. М.: Издательский дом Медиа Паблшер, 2019. С. 458-460.
13. *Панков К. Н.* Основные криптографические алгоритмы для построения систем распределенного реестра в Интернете вещей // Технологии информационного общества : Сборник трудов XIV Международной отраслевой научно-технической конференции, Москва, 18-19 марта 2020 года. М.: Издательский дом Медиа Паблшер, 2020. С. 224-227.

14. *Ткаченко Н. А., Панков К. Н.* Анализ угроз и требований к алгоритмам низкоресурсного шифрования для RFID-меток // *DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов*. 2025. Т. 15, № 2. С. 26-33. EDN QYHOOC.

15. *Ромашкова Д. Д., Подтопельный В. В.* Особенности криптографической защиты в компонентах системы Iot (STM-32 NUCLEO) // *Дни науки : Материалы Межвузовской научно-технической конференции студентов и курсантов, Калининград, 12-25 апреля 2021 года*. Калининград: Обособленное структурное подразделение "Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота" федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Калининградский государственный технический университет", 2021. С. 74-79.

16. *Сырцов, И. А., Крыжевич Л. С.* Защищенная передача данных в системе IOT при помощи метода // *Auditorium*. 2024. № 3(43). С. 53-57.

17. *Панков К. Н.* Оценки мощности классов отображений, применяемых в протоколах квантового распределения ключей // *Научные технологии в космических исследованиях Земли*. 2022. Т. 14, № 4. С. 4-18. DOI 10.36724/2409-5419-2022-14-4-4-18.

18. *Панков К. Н.* Асимптотические оценки для чисел двоичных отображений с заданными криптографическими свойствами // *Математические вопросы криптографии*. 2014. Т. 5, № 4. С. 73-97.

19. *Панков К. Н.* Локальная предельная теорема для распределения части вектора весов подфункций компонент случайного двоичного отображения // *Математические вопросы криптографии*. 2014. Т. 5, № 3. С. 49-80.

20. *Панков К. Н.* Улучшенные асимптотические оценки для числа корреляционно-иммунных и  $k$ -эластичных двоичных вектор-функций // *Дискретная математика*. 2018. Т. 30, № 2. С. 73-98. DOI 10.4213/dm1484.

21. *Pankov K. N.* Improved asymptotic estimates for the numbers of correlation-immune and  $k$ -resilient vectorial Boolean functions // *Discrete Mathematics and Applications*. 2019. Vol. 29, No. 3, pp. 195-213. DOI 10.1515/dma-2019-0018.

22. *Панков К. Н., Миронов Ю. Б.* Использование постквантовых алгоритмов в задачах защиты информации в телекоммуникационных системах. М.: Горячая линия – Телеком, 2023. 236 с. ISBN 978-5-9912-1015-7. EDN MTJUL

# ПОСТРОЕНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ МОДЕЛИ СТАТИСТИЧЕСКОГО АРБИТРАЖА НА ОСНОВЕ КОИНТЕГРАЦИОННЫХ СООТНОШЕНИЙ

**Бирюков Никита Александрович**

МТУСИ, студент группы БПМ2201, Москва, Россия

[nikitymba12@gmail.com](mailto:nikitymba12@gmail.com)

**Синева Ирина Сергеевна**

МТУСИ, доцент каф. ТВ и ПМ, к.ф.-м.н., Москва, Россия

[iss@mtuci.ru](mailto:iss@mtuci.ru)

## Аннотация

В работе рассматривается задача разработки и анализа математической модели статистического арбитража на основе стационарно связанных финансовых временных рядов. Для выявления долгосрочных равновесных зависимостей между активами используются тесты коинтеграции Энгла–Грейнджера и Йохансена. На основе найденного коинтеграционного соотношения формируется стационарный спред, моделируемый как mean-reversion процесс, что позволяет применять его для построения рыночно-нейтральных стратегий. Предложена математическая модель целевой позиции, основанная на нормализованных отклонениях спреда от равновесного состояния. Разработан алгоритм автоматизированного управления позицией, включающий вычисление индикаторов, генерацию торговых сигналов и принятие решений о входе и выходе из позиции. Параметры модели оптимизируются с использованием методов стохастического поиска (Optuna), что обеспечивает численное нахождение конфигураций, максимизирующих эффективность стратегии по выбранным метрикам. Проведён вычислительный эксперимент на исторических данных, включающий анализ поведения модели в различных рыночных условиях и оценку влияния параметров на итоговые характеристики стратегии. Полученные результаты подтверждают применимость коинтеграционных моделей и методов стохастической оптимизации для построения автоматизированных систем статистического арбитража. Реализация в виде программного модуля на Python демонстрирует практическую применимость подхода для построения автоматизированных аналитических систем.

## Ключевые слова:

статистический арбитраж; парный трейдинг; коинтеграция; стационарные временные ряды; mean-reversion; автоматизация принятия решений; математическое моделирование; алгоритмическая торговля; байесовская оптимизация; Optuna; машинное обучение в финансах; backtesting; обработка финансовых данных.

## Введение

Современные финансовые рынки характеризуются высокой волатильностью, большим объемом данных и сложной взаимосвязью между активами. В этих условиях становится особенно важным применение математических методов и алгоритмов анализа данных для построения устойчивых торговых стратегий, способных извлекать прибыль при ограничении рисков [1-5].

Одним из таких подходов является парный трейдинг – статистически обоснованная стратегия, основанная на выявлении пар финансовых инструментов с устойчивой исторической взаимосвязью (коинтеграцией) и использовании временных отклонений их цен от равновесного состояния. Применение методов парного трейдинга позволяет находить рыночные неэффективности, которые могут быть использованы для построения рыночно-нейтральных стратегий, менее подверженных общерыночным колебаниям.

Актуальность исследования обусловлена тем, что в условиях роста объемов рыночных данных и развития алгоритмической торговли требуется формирование формализованных и вычислительно эффективных моделей анализа временных рядов. Такие модели должны обеспечивать стабильность и воспроизводимость результатов на реальных данных, что напрямую связано с задачами прикладной математики, статистики и машинного обучения. Рост объемов рыночных данных (Big Data) и развитие алгоритмической торговли требуют создания высокопроизводительных вычислительных конвейеров (computational pipelines), способных к автоматическому выявлению паттернов, оптимизации и backtesting стратегий. Это напрямую соотносится с задачами data mining и инженерии машинного обучения в рамках ИКТ технологий.

Кроме того, развитие методов парного трейдинга представляет интерес не только для практической торговли, но и для академических исследований в области математического моделирования финансовых процессов, анализа стохастических систем и оптимизации. Таким образом, разработка и исследование математических моделей и алгоритмов парного трейдинга является актуальной задачей современной прикладной математики.

### Математическое моделирование статистического арбитража

Целью данной работы является разработка и исследование алгоритмической торговой стратегии парного трейдинга, основанной на коинтеграционной связи между двумя финансовыми инструментами [6-9].

Идея стратегии заключается в том, что если два актива имеют долгосрочную равновесную зависимость, то их линейная комбинация (спред) является стационарным процессом, а следовательно, отклонения от среднего значения носят временный характер и могут быть использованы для извлечения прибыли.

Задача формализуется как оптимизация параметров торговой стратегии, максимизирующей показатель эффективности — коэффициент Шарпа.

Для анализа потребуется предварительная обработка исходных данных. Пусть заданы временные ряды цен двух финансовых инструментов:  $\{P_{1,t}\}_{t=1}^T$ ,  $\{P_{2,t}\}_{t=1}^T$ , где  $P_{i,t}$  — цена инструмента  $i$  момент времени  $t$ . Для устранения зависимости от масштаба и приведения к аддитивной форме используем логарифмические преобразования:

$$X_t = \ln(P_{1,t}), Y_t = \ln(P_{2,t}) \quad (1)$$

и логарифмические доходности:

$$r_{1,t} = X_t - X_{t-1}, r_{2,t} = Y_t - Y_{t-1} \quad (2)$$

Для дальнейшего анализа формируются два массива данных:  $\{r_{1,t}\}_{t=1}^T$  и  $\{r_{2,t}\}_{t=1}^T$ , представляющих логарифмические приращения цен (1-2).

#### Коинтеграционная модель и построение спреда

Предположим, что существует коэффициент  $\beta \in R$ , такой что линейная комбинация логарифмов цен  $S_t = X_t - \beta Y_t$  является стационарным процессом.

В этом случае  $X_t$  и  $Y_t$  называются коинтегрированными рядами [10]. Общие подходы на модельных данных были представлены в [11].

Стационарность спреда  $S_t$  проверяется при помощи статистических тестов:

- Augmented Dickey–Fuller (ADF) — тест на наличие единичного корня;
- Johansen test — определение ранга коинтеграции и оценка вектора коэффициентов  $\beta$ .

Если гипотеза о стационарности принимается, то  $S_t$  можно интерпретировать как временно отклоняющийся от равновесия процесс, имеющий тенденцию возвращаться к среднему уровню  $\mu$ .

#### Модель спреда и нормализация

Для анализа колебаний спреда относительно равновесного значения используется z-score нормализация:

$$z_t = \frac{S_t - \mu_t}{\sigma_t}, \quad (3)$$

где:

$\mu_t$  – скользящее среднее спреда (например, экспоненциальное, ЕМА) за период  $n$ ,

$\sigma_t$  – сглаженная оценка стандартного отклонения за тот же период.

Сглаживание (3) позволяет уменьшить чувствительность к шуму и случайным колебаниям.

#### Модель стратегии

На основе значений  $z_t$  формулируются сигналы для открытия и закрытия позиций  $\pi_t$ .

Пусть заданы пороговые значения  $0 < \theta_{close} < \theta_{open}$ . Тогда правила стратегии описываются следующими соотношениями:

$$\pi_t = \begin{cases} -1, & z_t > \theta_{open} \text{ (short spread)} \\ +1, & z_t < -\theta_{open} \text{ (long spread)} \\ 0, & |z_t| < \theta_{close} \text{ (close position)} \\ \pi_{t-1}, & \text{else (hold position)} \end{cases} \quad (4)$$

Величина позиции (4) ограничивается по модулю:

$$|\pi_t| \leq \pi_{max}$$

где  $\pi_{max}$  — параметр лимита позиции.

#### Модель доходности стратегии

Доходность стратегии в момент времени  $t$  определяется как:

$$r_t^{(s)} = \pi_t \cdot \Delta S_t - c \cdot |\pi_t - \pi_{t-1}|, \quad (5)$$

где:

$\Delta S_t = S_t - S_{t-1}$  – изменение спреда,

$c$  – коэффициент транзакционных издержек (slippage).

Второе слагаемое в (5) учитывает стоимость смены позиции.

Кумулятивная доходность определяется как:

$$R_t = \sum_{k=1}^t r_k^{(s)}$$

#### Оптимизация параметров стратегии

Для максимизации эффективности стратегии требуется подобрать набор параметров:

$$\Theta = \{ \beta, n_1, n_2, \theta_{open}, \theta_{close}, \pi_{max} \}, \quad (6)$$

который обеспечивает наилучшее значение выбранной целевой функции.

В качестве целевой функции выступает годовой коэффициент Шарпа:

$$Sharpe(\Theta) = \frac{E(r_t^{(s)})}{\sigma(r_t^{(s)})} \cdot \sqrt{252}, \quad (7)$$

где 252 – число торговых дней в году.

Оптимизационная задача для (6-7) формулируется как:

$$\begin{cases} Sharpe(\Theta) \rightarrow \max \\ n_1, n_2 \in N \\ 0 < \theta_{close} < \theta_{open} \\ 0 < \beta < 5 \\ 1 \leq \pi_{max} \leq 5 \end{cases} \quad (8)$$

Решение задачи (8) производится с использованием стохастического оптимизатора Optuna, реализующего байесовскую оптимизацию гиперпараметров. Каждая итерация (trial) Optuna генерирует новый набор параметров  $\Theta$ , по которым выполняется backtest стратегии и вычисляется значение Sharpe ratio.

#### Критерии качества и интерпретация

Результатом оптимизации является набор параметров  $\Theta^*$ , обеспечивающих максимальное значение коэффициента Шарпа на обучающем (in-sample) периоде. Для проверки устойчивости решения проводится тестирование на вневыборочном (out-of-sample) интервале.

Дополнительно оцениваются показатели:

– годовая доходность:

$$R_{ann} = 252 \cdot E(r_t^{(s)})$$

– годовая волатильность:

$$\sigma_{ann} = \sqrt{252} \cdot \sigma(r_t^{(s)})$$

Таким образом, задача парного трейдинга в рамках статистического арбитража формулируется как задача условной стохастической оптимизации:

$$J(\Theta) \rightarrow \max, \text{ где } J(\Theta) = \frac{E(r_t^{(s)}(\Theta))}{\sigma(r_t^{(s)}(\Theta))}$$

при ограничениях на параметры стратегии и данных.

Функция  $J(\Theta)$  нелинейна и вычисляется через моделирование (backtest), поэтому аналитическое решение недостижимо и используется численная оптимизация.

#### Алгоритмы для реализации предложенных моделей

##### Алгоритм вычисления экспоненциального скользящего среднего (EMA)

Для оценки локального среднего и стандартного отклонения спреда используется экспоненциальное скользящее среднее – *Exponential Moving Average (EMA)*. В отличие от простого среднего,

ЕМА придаёт больший вес последним наблюдениям, что повышает чувствительность к изменениям рынка.

Пусть  $S_t$  – спред. Тогда ЕМА  $\mu_t$  определяется рекурсивно:

$$\mu_t = \alpha S_t + (1 - \alpha) \mu_{t-1},$$

где  $\alpha = \frac{2}{n+1}$ , а  $n$  – период сглаживания.

Аналогично вычисляется сглаженная оценка стандартного отклонения:  $\sigma_t = \alpha |S_t - \mu_t| + (1 - \alpha) \sigma_{t-1}$ , что уменьшает влияние выбросов.

#### Алгоритм нормализации спреда (расчёт z-score)

После вычисления сглаженных характеристик формируется z-score, определяющий степень отклонения спреда от своего равновесного значения (3).

Эта характеристика используется как основной критерий надежности торгового сигнала. Чем больше отрицательное значение z-оценки, тем сильнее сигнал на открытие позиции против существующего отклонения ценового движения. Эта стратегия основана на концепции возврата к средним значениям («mean-reversion»), ожидая коррекцию рынка к своему усреднённому состоянию:

$$\pi_t = -k \cdot z_t(\eta),$$

где  $z_t(\eta)$  – сглаженный показатель  $z_t$  с некоторым окном  $\eta$ , а  $k$  – коэффициент агрессивности стратегии (в дальнейшем равен 5).

#### Алгоритм тестирования стационарности (ADF)

Для проверки того, что построенный спред  $S_t$  действительно является стационарным, применяется расширенный тест Дики–Фуллера (Augmented Dickey-Fuller, ADF).

Модель теста:

$$\Delta S_t = \alpha + \beta t + \gamma S_{t-1} + \sum_{i=1}^{p-1} \delta_i \Delta S_{t-i} + \varepsilon_t$$

Основная проверяемая гипотеза имеет вид  $H_0 : \gamma = 0$ . Это соответствует наличию единичного корня, и, соответственно нестационарности. Альтернатива  $H_1 : \gamma < 0$  означает стационарность ряда в узком смысле. Если статистика теста меньше критического значения — гипотеза  $H_0$  отвергается, и ряд считается стационарным.

#### Алгоритм тестирования коинтеграции (Johansen Test)

Для определения наличия и числа коинтеграционных связей используется тест Йохансена [12], основанный на векторной авторегрессии (VAR).

Модель имеет вид:

$$\Delta \mathbf{V}_t = \mathbf{\Pi} \mathbf{V}_{t-1} + \sum_{i=1}^{p-1} \mathbf{\Gamma}_i \Delta \mathbf{V}_{t-i} + \mathbf{E}_t$$

где:  $\mathbf{V}_t = [\mathbf{X}_t, \mathbf{Y}_t]^T$  – вектор логарифмов цен;  $\mathbf{\Pi} = \langle \alpha, \beta \rangle$  – матрица, определяющая коинтеграционные соотношения.

Число ненулевых собственных значений матрицы  $\mathbf{\Pi}$  соответствует рангу коинтеграции. Если ранг  $r = 1$ , то существует единственная стационарная линейная комбинация:  $S_t = \beta_1 X_t + \beta_2 Y_t$

*Алгоритм вычисления показателей эффективности*

Основными количественными показателями эффективности стратегии являются:

1. Годовая доходность:  $R_{ann} = 252 \cdot E(r_t^{(s)})$
2. Годовая волатильность:  $\sigma_{ann} = \sqrt{252} \cdot \sigma(r_t^{(s)})$
3. Коэффициент Шарпа (Sharpe Ratio):  $SR = \frac{R_{ann}}{\sigma_{ann}}$

Здесь 252 – число торговых дней в году. Эти показатели позволяют объективно сравнивать стратегии, независимо от масштаба и волатильности.

*Алгоритм стохастической оптимизации параметров (Optuna)*

Оптимизация параметров стратегии выполняется методом байесовской оптимизации. Расчеты проводились с использованием Python библиотеки Optuna, достоинством которой является автоматизация подбора гиперпараметров в задачах машинного обучения [13-18]. Каждая итерация (trial) генерирует набор параметров:

$$\Theta = \{ \beta, n_1, n_2, \theta_{open}, \theta_{close}, \pi_{max} \}$$

после чего проводится тестирование (backtest) и вычисляется значение коэффициента Шарпа.

Целевая функция (объектив) –  $J(\Theta)$ , и задача формулируется как  $J(\Theta) \rightarrow \max$ .

Параметры выбираются стохастически с использованием методов типа Tree-structured Parzen Estimator (ТРЕ), что обеспечивает адаптивный баланс между исследованием пространства параметров (exploration) и уточнением найденных экстремумов (exploitation).

*Алгоритм бэктеста стратегии*

Бэктест (backtest) – это моделирование поведения стратегии на исторических данных с целью оценки её доходности и устойчивости. Для каждого дня вычисляется:  $r_t^{(s)} = \pi_t \cdot \Delta S_t - c \cdot |\pi_t - \pi_{t-1}|$

Далее на основе временного ряда  $r_t^{(s)}$  рассчитываются итоговые показатели эффективности. Бэктест реализует полный цикл моделирования, включая ограничение позиций, учёт проскальзывания и построение графиков капитала.

Все описанные выше алгоритмы были реализованы в едином программном стеке (Python, pandas, NumPy, statsmodels, Optuna), что обеспечило их интеграцию в целостную систему анализа данных.

**Архитектура программного комплекса и вычислительный эксперимент**

Разработанная математическая модель и алгоритмы были реализованы в виде модульного программного комплекса на языке Python. Архитектура системы (рис. 1) следует pipeline, типичному для задач автоматизированной торговли и анализа данных:

1. Модуль загрузки и предобработки данных: Получение исторических котировок, вычисление логарифмических цен и доходностей, обработка пропусков.
2. Модуль анализа коинтеграции: Последовательное применение тестов Дики-Фуллера (ADF) и Йохансена для идентификации стационарных пар и оценки вектора коинтеграции  $\beta$ . Вычислительная сложность данного этапа составляет  $O(n^2)$  для теста Йохансена, что обуславливает выбор эффективных библиотек (statsmodels).
3. Модуль построения и нормализации спреда: Расчет спреда, его сглаженных характеристик (ЕМА, сглаженное стандартное отклонение) и z-score в реальном времени. Рекурсивные формулы ЕМА обеспечивают сложность  $O(n)$  по времени и  $O(1)$  по памяти для обработки потоковых данных.

4. Оптимизационный модуль: Интеграция с фреймворком Optuna для байесовской оптимизации гиперпараметров ( $\theta_{open}$ ,  $\theta_{close}$ , период сглаживания). Использование алгоритма TPE (Tree-structured Parzen Estimator) позволило эффективно исследовать высокоразмерное пространство параметров, избегая затратного полного перебора.

5. Модуль бэктестинга (Backtest): Симуляция торговой стратегии с учетом транзакционных издержек и ограничений позиции. Генерация временных рядов доходности и расчет итоговых метрик (Sharpe Ratio, годовая доходность, волатильность).

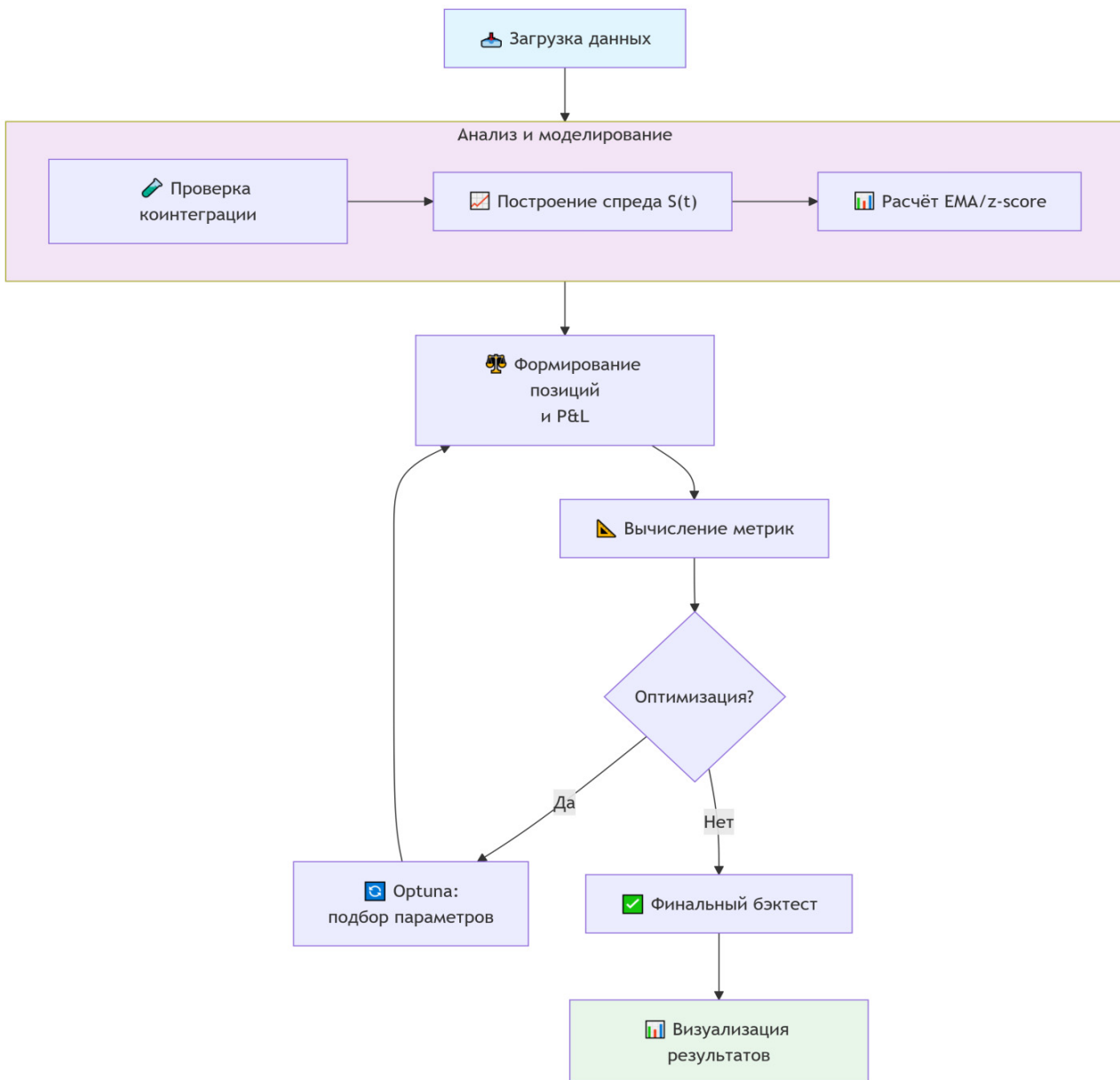


Рис. 1. Архитектура программного комплекса

Ключевым технологическим результатом является не только математическая модель, но и создание гибкого программного каркаса, который позволяет проводить скрининг множества пар активов, их автоматическую оптимизацию и валидацию. Вычислительный эксперимент, проведенный на исторических данных, подтвердил работоспособность комплекса. Анализ чувствительности показал существенную зависимость итоговой эффективности (Sharpe Ratio) от подобранных гиперпараметров, что обосновывает необходимость применения продвинутых методов оптимизации, таких как Optuna, вместо ручного или сеточного поиска.

## Заключение

В статье решена задача построения и оптимизации модели статистического арбитража с использованием методов коинтеграции и стохастической оптимизации. Формализована математическая модель торговой стратегии, генерирующей сигналы на основе отклонения нормализованного спреда от равновесного уровня. Основное внимание уделено алгоритмической и вычислительной стороне реализации.

Разработаны и описаны ключевые алгоритмы, формирующие ядро системы: тестирование стационарности (ADF) и коинтеграции (Йохансен), адаптивная нормализация спреда, а также алгоритм стохастической оптимизации гиперпараметров на основе байесовских методов (Optuna). Последний показал свою эффективность для решения задач с «дорогой» нелинейной целевой функцией, типичных для финансового моделирования.

Проведенное исследование подтверждает, что современные фреймворки автоматизированного машинного обучения (AutoML) являются мощным инструментом не только в классических задачах ML, но и в области количественных финансов, позволяя преодолевать ограничения аналитического решения и ручного подбора параметров.

К перспективам работы относится расширение модели на множественные коинтеграционные соотношения (векторная коинтеграция), учет режимов рынка (смена волатильности) в алгоритме управления, а также интеграция предложенного конвейера в распределенную вычислительную среду для обработки Big Data в масштабах всего рынка.

## Литература

1. *Greenwald B.* Pair Trading: Quantitative Methods and Strategies. Moscow: Alpina Publisher, 2017. 250 p. ISBN 978-5-9614-6227-7.
2. *Weinstein B.* Systematic Trading: Quantitative Methods for Managing Risk, Arbitrage, and Trading. Moscow: Olimp-Business, 2006. 376 p. ISBN 5-9693-0036-0.
3. *Гатауллин Р.Р., Соколов А.В.* Алгоритмический трейдинг: теория и практика. Москва: ДМК-Пресс, 2019. 334 с. ISBN 978-5-97060-719-5.
4. *Chan E.P.* Quantitative Trading: How to Build Your Own Algorithmic Trading Business. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2009. 300 p. ISBN 978-0-470-29061-0.
5. *Avellaneda M., Lee J.H.* Statistical Arbitrage in the US Equity Markets. Quantitative Finance. 2010, vol. 10, no. 7, pp. 761-782. doi: 10.1080/14697680903124632.
6. *Engle R. F.* Cointegration and error correction: representation, estimation, and testing. Econometrica. 1987, vol. 55, no. 2, pp. 251-276.
7. *Johansen S.* Statistical analysis of cointegration vectors. Journal of Economic Dynamics and Control. 1988, vol. 12, nos. 2-3, pp. 231-254. doi: 10.1016/0165-1889(88)90041-3.
8. *Носко В.В.* Эконометрика. Введение в регрессионный анализ временных рядов. М.: Дело АНХ, 2002. 272 с. ISBN 5-7749-0309-5.
9. *Айвазян С.А.* Прикладная статистика и основы эконометрики. Учебник для вузов. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2001. 656 с. ISBN 5-238-00314-X.
10. *Engle R. F., Granger C. W. J.* Co-Integration and Error Correction: Representation, Estimation, and Testing // Econometrica, Vol. 55, No. 2. (Mar., 1987), pp. 251-276.
11. *Afonin N. V., Skorodumova E. A.* Time Series Analysis for Cointegration // 2025 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF), St. Petersburg, Russian Federation, 2025, pp. 1-4, doi: 10.1109/WECONF65186.2025.11017151.
12. Statsmodels Development Team. statsmodels: statistical models in Python. Online resource. Available at: <https://www.statsmodels.org/stable/index.html>. (дата обращения 20.11.2025).
13. *Akmal S., et al.* Optimization of Hyperparameters Using Optuna: Modern Framework for Automated Machine Learning. Proceedings of the 25th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining (KDD '19), 2019, pp. 2623-2631. doi: 10.1145/3292500.3330701.
14. *Feurer M., Hutter F.* Hyperparameter Optimization // Automated Machine Learning: Methods, Systems, Challenges. Springer, Cham, 2019, pp. 3-33. doi: 10.1007/978-3-030-05318-5\_1.
15. Optuna Development Team. Optuna: A hyperparameter optimization framework. Online resource. Available at: <https://optuna.org/>. (дата обращения 20.11.2025).

16. Fengpei Li Stochastic Methods in Optimization and Machine Learning, Submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy under the Executive Committee of the Graduate School of Arts and Sciences. Columbia university: 2021. 272 с.

17. *McKinney W.* Python for Data Analysis. Second edition. Saint Petersburg: Peter Publishing House, 2020. 544 p. ISBN 978-5-4461-1321-2.

18. Backtrader Development Team. Backtrader: Python backtesting library for trading strategies. Online resource. Available at: <https://www.backtrader.com/>. (дата обращения 20.11.2025).

## MFSK-OFDM МОДЕМ ДЛЯ УЗКОПОЛОСНЫХ РАДИОКАНАЛОВ

**Елисеев Сергей Николаевич**

*МТУСИ, профессор, д.т.н., Москва, Россия*

[fgupnrsnr@yandex.ru](mailto:fgupnrsnr@yandex.ru)

### **Аннотация**

*В данной работе рассматриваются вопросы разработки устройства, выполняющего на физическом уровне функции модема в радиоканалах стандартной узкой полосы частот цифровых систем передачи информации. В качестве базовой структуры модема на передающей стороне выбран MFSK модулятор, в виде цифрового вычислительного синтезатора (DDS) с дополнительными функциями, реализующими цифровую частотную и фазовую модуляцию. Приёмная часть устройства является некогерентным демодулятором, выполненным по квадратурной схеме. Схема модема, улучшающая эффективность использования частотного ресурса достигается применением гибридной модуляции MFSK-2DPSK. Оценена помехоустойчивость рассматриваемой схемы. Полученные в работе результаты могут найти применение в рамках подхода импортозамещения модемов, обеспечивающих инфраструктуру низового уровня сетей узкополосной межмашинной и другой технологической связи.*

### **Ключевые слова:**

*модем, узкополосный радиоканал, некогерентный демодулятор, MFSK модуляция, 4FSK-2DPSK гибридная модуляция, цифровой вычислительный синтезатор (DDS)*

### **1. Введение**

Технология межмашинной (M2M) связи, одна из главных составляющих в национальном проекте «Цифровая экономика» позволяет оконечным устройствам обмениваться данными без вмешательства в процесс человека, что повышает эффективность, точность и скорость функционирования процессов в различных отраслях от добычи и транспортировки полезных ископаемых, производства до медицины. Оконечные устройства могут быть разной природы: датчики, потребительская электроника, системы видеонаблюдения и контроля, банкоматы и т.д. По экспертным оценкам в 2025г. численность таких устройств составляет 40 млн. экземпляров. Специфика современного периода технологии M2M в РФ – развёртывание «импортозамещения» – накладывается на географическую природу страны: заметная доля территории покрывается большими площадями, в том числе малонаселёнными районами, следовательно большими расстояниями между оконечными устройствами M2M. Все вышеперечисленные факторы свидетельствуют об актуальности решения проблемы развития цифровой инфраструктуры на самом нижнем, «массовом» уровне, на базе устройств отечественной разработки, иллюстративным примером могут служить устройства технологии LPWAN-маломощных устройств большого радиуса действия. Кроме того пользователи технологической связи становятся всё более мобильными, в том числе участниками V2V(мобильный с мобильным) сети, в которой накладываются жёсткие ограничения на допустимую величину задержки сообщений в канале [1].

В состав инфраструктуры естественным образом должны быть включены устройства существующих систем цифровой связи низового уровня[2]. Важно так же, для обеспечения ЭМС сохранить преемственность в назначении и выполнении установленных требований по назначению и распределению ресурсов радиочастотного спектра, прежде всего по ширине полосы отдельного радиоканала. Несмотря на впечатляющие успехи радиоэлектроники очевидна важность сохранения при этом, простоты реализации предлагаемых устройств (модемов). Учитывая вышеизложенные обстоятельства представляется целесообразным ориентироваться на некогерентные методы демодуляции при создании модемов обеспечивающих работоспособность в широком диапазоне условий (большие расстояния, V2V связи, сложность получения надёжной оценки характеристик канала, особенно для малого времени задержки передаваемых данных. Существующим регламентом назначения частот для радиоканалов предусмотрено выделение полосы для одного радиоканала шириной 12,5кГц. Именно такой радиоканал далее именуется узкополосным.

## 2. Описание принципов построения модема

Системы OFDM-MFSK [4], как это следует из наименования и принципа их действия объединяют способ передачи одной из  $M$  поднесущих сигнала OFDM, оставляя  $M-1$  поднесущую вакантными (рис.1), с ортогональным способом передачи всех  $N \gg M$  поднесущих, при котором на каждой поднесущей возможна передача цифровых данных с применением различных видов модуляции (таких как MPSK, M-QAM) независимо друг от друга. В случае многопользовательского режима часть общего числа поднесущих  $N_a$  может быть сгруппирована для передачи данных одного пользователя (режим OFDMA) [4]. Для подавления эффектов межсимвольной интерференции  $T_s$  – интервал передачи одного символа удлиняют на величину защитного интервала, как правило в виде циклического префикса  $T_{cp}$  [2, 3]:  $T_s = T + T_{cp}$ , где  $T = 1/\Delta f$ , где  $\Delta f$  – разнос ортогональных частот MFSK.

В настоящей статье предметное рассмотрение MFSK выполняется на примере наиболее применяемого на практике режима 4FSK, являющегося синхронным вариантом легендарной ДЧТ телеграфии, основы магистральной сети KB связи СССР вплоть до 70-ых годов.

На рис. 1 показаны расположение поднесущих в порядке возрастания частоты, а так же соответствие поднесущих дибитам переносимых данных. Цветом выделенные активные частоты. В устройстве реализована особая схема кодирования цифровых данных, известная как код Грея [3-5]. Это кодировка минимизирует вероятность битовых ошибок при демодуляции за счет того, что соседние частотные поднесущие в 4FSK отличаются только одним битом (рис. 1).

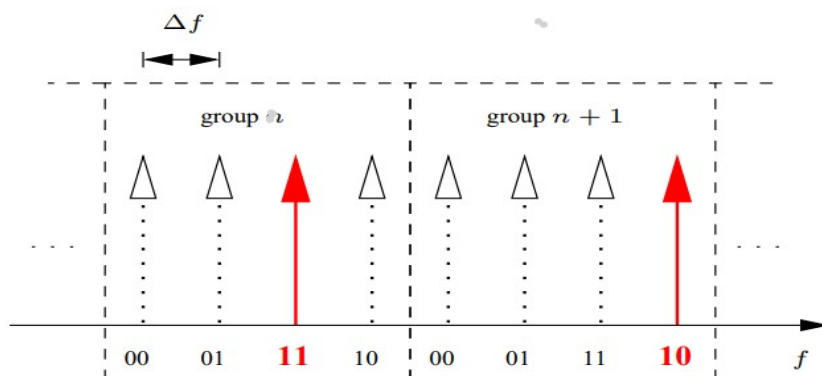


Рис. 1. Размещение поднесущих 4FSK в полосе канала

### 2.1. Формулировка основных исходных данных

1. Ширина полосы частот канала 12.5кГц. Так как пересмотр положений и регламентов при распределении и назначении ресурсов частотного спектра влечёт за собой комплекс административных, технических и других проблем, желательно вписаться в действующий регламент частотных назначений.

2. Некогерентный метод демодуляции. Устройство может быть мобильным, в том числе размещаться на высокоскоростных транспортных средствах, следовательно вариант когерентной демодуляции, а значит получение эффективной оценки канала требует привлечения заметной доли ресурсов канала и усложнения устройства.

3. Использование алгоритмов ЦОС низкого уровня сложности. Для упрощения изложения, там, где возможно вместо устройств ЦОС рассматриваются их аналоговые эквиваленты.

4. Учитывая характер сетей M2M и сетей LPWAN в частности, предполагаемый диапазон преимущественного использования модемов 300МГц. Поскольку в нём развёрнуто малое количество сетей радиосвязи.

### 2.2. Определение основных параметров сигналов системы OFDM-MFSK

#### Базовый режим OFDM-4FSK

В режиме В1 вся полоса частот канала  $F_k = 12,5$  кГц отводится для передачи 4-ёх частот группы  $n$  (рис. 1). Для сигналов OFDM соблюдение условия взаимной ортогональности имеет вид [4, 5]:

$\Delta f = (f_i - f_{i-1})$  – частотный разнос между несущими поднесущими;  $\Delta f = 1/T$ , где  $T$  – интервал обработки сигнала, переносчика символа на приёмной стороне системы. Скорость передачи символов на одной поднесущей  $V_s = 1 / T_s$ , где  $T_s$  – интервал передачи символа;  $T_s = T + T_g$ , защитный интервал, обычно измеряемый в долях от  $T$  ( $g < 1$ ). Величина  $T_g$  для устранения межсимвольной интерференции должна превышать эффективное время разброса запаздывания лучей в радиоканале [4]. При эквидистантном расположении 4-ёх частот  $\Delta f = F_k / 5 = 2,5$  кГц. Откуда следует  $T = 1 / 2,5$  кГц = 400 мкс. Ближайшее значение из стандартного ряда скоростей  $V_s = 2400$  симв/сек или битовая скорость  $V_b = 4800$  бит/сек. При расстановке частот от  $f_1 = 2,5$  кГц до  $f_4 = 10$  кГц. Интервал длительности передаваемого символа OFDM  $T_s = T + T_{cp} = 416,167$  мкс.

### Гибридная модуляция в OFDM-MFSK

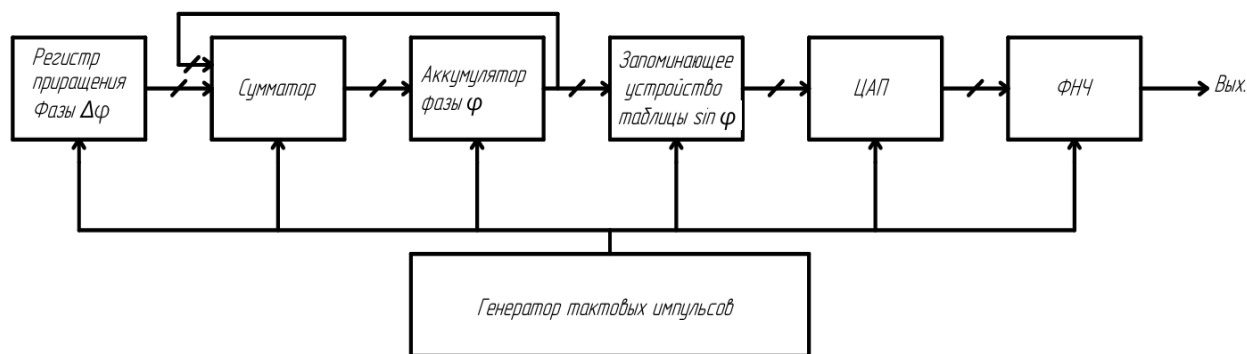
Повысить спектральную эффективность модема вдвое можно реализовав в нём режим гибридной модуляции 4FSK-2DPSK. Модуляция 2DPSK или как её ещё называют DQPSK то есть двойная или квадратурная фазоразностная модуляция [2, 3]. Дибиты цифровых сообщений источника в передаваемых сигналах отображаются в разности фаз двух символов  $n$ -того референтного (опорного) и  $(n+1)$ -го информационного. Таким образом передаваемые символы принимают 4 значения фазы. Способ отображения которых, вновь соответствует коду Грея.

Этот вид гибридной модуляции был предложен и исследован М. Wetz в [5]. Очевидно, что гибридный режим м.б. «надстроен» над каждым базовым режимом OFDM-MFSK. Скорость передачи дополнительных дибитов переносимых 2DPSK полностью определяется скоростью базовой 4FSK передачи: результирующая скорость гибридного режима удваивает скорость передачи базового режима.

### **2.3 Передающая часть модема**

Для точного синтеза рабочих частот, требуемых в модеме *MFSK*, использована цифровая схема синтеза на основе DDS генератора (DDS-direct digital syntesis) [5]. Эта технология, называемая так же цифровым вычислительным синтезом сигналов обладает рядом ключевых преимуществ по сравнению с традиционными аналоговыми синтезаторами, включая беспрецедентную точность настройки, мгновенную перестройку частоты и исключительную стабильность выходного сигнала. Стабильность частоты фактически определяется стабильностью частоты генератора тактовых импульсов частоты  $f_t$ . Принцип работы DDS основан на математическом моделировании синтезируемых сигналов с использованием цифровых алгоритмов, что позволяет в широком диапазоне генерировать сигналы различной формы. В перспективе данная система может быть масштабирована для работы в сетях более высокого уровня и интегрирована в состав уже существующих решений LPWAN, включая NB-IoT, с возможностью адаптации протокольного уровня под нужды конкретной предметной области [7]. Переход к другому уровню функциональности может быть реализован без полной переработки аппаратной части, за счёт её модульности и гибкости архитектуры с программно-конфигурируемыми параметрами.

На рисунке 2 представлена схема DDS генератора с возможностью выбора синтезируемой частоты с помощью управляемого цифровым кодом синтезатора [6]:



**Рис. 2.** Структурная схема DDS генератора

Основным элементом в данной структуре является аккумулятор фазы (накапливающий сумматор), обновляющий свое содержимое с каждым циклом работы схемы. При обновлении аккумулятора фазы, цифровой код  $M$ , содержащийся в регистре инкремента (шага) фазы добавляется к цифровому коду в регистре аккумулятора фазы. Код, содержащийся в аккумуляторе фазы используется для управления адресом таблицы синуса (косинуса), содержащейся в ПЗУ. Каждый адрес ПЗУ соответствует определенной точке фазы периода синуса(косинуса) от 0 до  $2\pi$ . В дальнейшем цифровое значение амплитуды передается на ЦАП, где сигнал преобразуется в аналоговую форму, фильтруется НЧ фильтром, после чего усиливается и передается.

Тактовая частота генератора является основным параметром, определяющим точность и качество генерации сигналов соответствующих частот. Для рассматриваемого случая предлагается использовать тактовую частоту генератора  $f_T$  порядка 310-320 кГц. Выбор конкретного номинала частоты м.б. сделан исходя из возможности исключить погрешность квантования значений отсчетов таблицы (согласно формулы ниже) при кратности генерируемых частот тактовой частоте. В нашем случае 4FSK, как будет показано ниже целесообразно выбрать  $f_T = 240$  кГц. Описанная выше система DDS получается очень гибкой и обладает высокой разрешающей способностью

$$f_0 = ((N_{ph} \times f_T / 2^n)) f_0, \quad (1)$$

где:  $f_0$  – требуемая синтезируемая частота Гц;  $f_T$  – тактовая частота генератора Гц;  $N_{ph}$  – объем ПЗУ таблицы;  $n$  – разрядность ПЗУ.

В передающей части модема используются следующие дополнительные функциональные возможности DDS:

– 4FSK модуляция, для чего требуется на каждом интервале  $T_s$  управлять кодом настройки частоты DDS, таким образом, чтобы в соответствии с потоком дибитов передаваемого сообщения генерировались сигналы соответствующей частоты. Желаемые значения м.б. запрограммированы в регистрах DDS и на выходе активизируется одна из 4-х частот;

– DPSK модуляция, при этом в регистре установки начальной фазы (фактически начального адреса ЗУ (возможно ПЗУ или ОЗУ) устанавливается значение фазы, которое суммируется с текущим значением фазы и сформированный сигнал поступает на выход DDS. В составе схемы 4 фазовых регистра, по числу синтезируемых частот, в которых обновляются содержание, в соответствии с дибитом передаваемого символа.

В общем случае гибридной MFSK-M<sub>1</sub>DPSK схема DDS синтезатора-модулятора трансформируется к виду, показанному на рис. 3, на котором добавлены блоки секвенсеров, формирователей последовательностей (sequences) сигналов управления частотой и фазой синтезируемых сигналов. В нашем случае схема значительно упрощается т.к. роль секвенсера управления частотой выполняет счётчик импульсов, управляемых передаваемыми дибитами сообщений базового уровня ( $a_n, b_n$ ) с коэффициентами пересчёта обращения к ЗУ преобразователя фаза-амплитуда 2,3,4 при синтезе частот 5; 7, 5; 10 кГц. А секвенсер управления фазой просто задаёт, по значениям передаваемых дибитов «надстройки» ( $c_n, d_n$ ) один из четырех начальных адресов отсчетов синтезируемой частоты. Первый сумматор на схеме рис. 3 может быть заменён на мультиплексер 4-1 управляемый вышеописанным счётчиком.

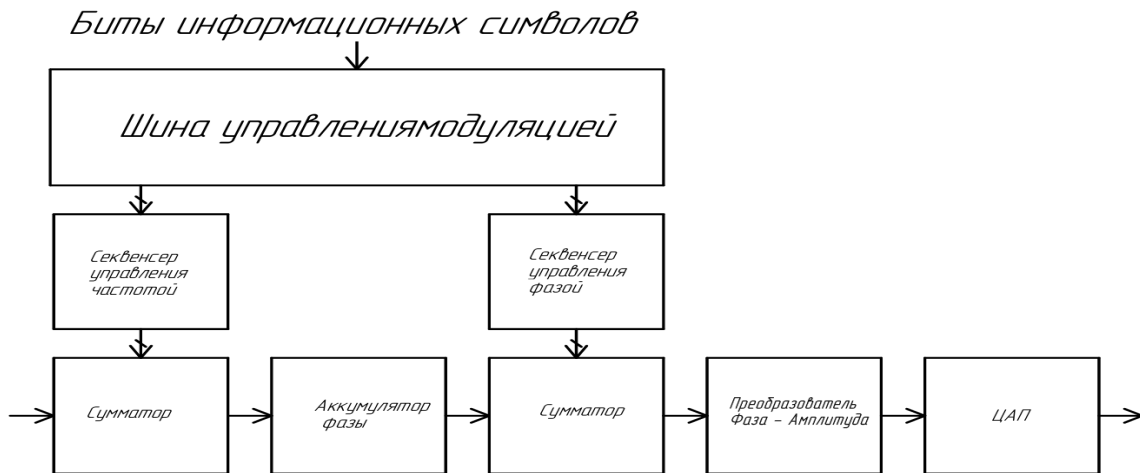


Рис. 3. Структурная схема синтезатора сигналов гибридной MFSK-DPSK модуляции

#### 2.4 Приемная часть модема: квадратурный демодулятор 4FSK-2DPSK

В приемнике используется некогерентный метод приема сигналов. Данный метод позволяет опустить процедуру оценки канала. приёмная часть терминала изображена на (рис. 4).

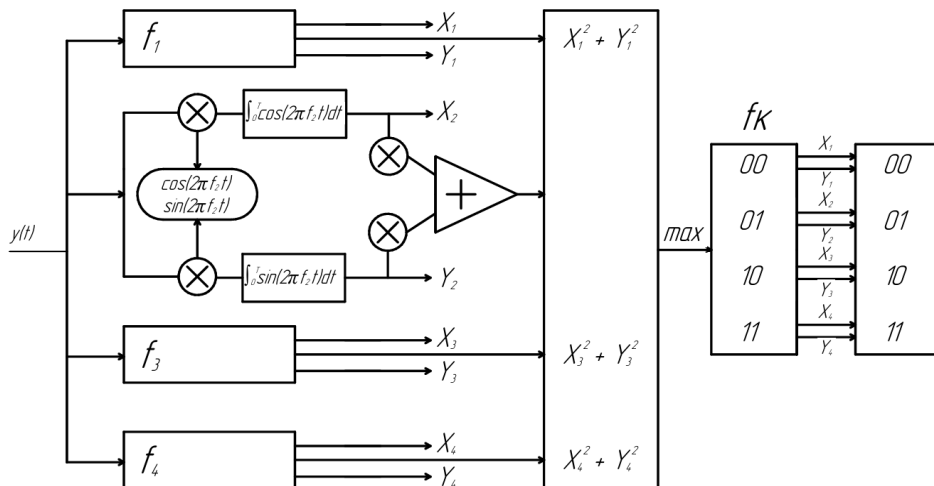


Рис. 4. Некогерентный демодулятор сигналов гибридной 4FSK-2DPSK модуляции

Схема рис. 4 работает следующим образом:

- 1) Сигнал с выхода ресивера после НЧ преобразования поступает на вход формирующего фильтра (на рис.4 не указан).
- 2)Фильтрация: каждый из 4-х каналов настроен на сигнал « своей» частоты  $f_m$ .
- 3)Сигналы умножаются на опорные сигналы-квадратурные компоненты( синус и косинус) соответствующей частоты.
- 4)Полученные значения проходят через интеграторы, результаты двух смежных сигнальных интервалов сохраняются.
- 5)Детекторы определяют переданную частоту сигнала 4FSK, по максимальному значению квадрата модуля. одного из сравниваемых сигналов.
- 6) Анализ сигналов квадратурных компонент позволяет определить значения передаваемого фазового сдвига, сравнением значений фаз соседних посылок, который м.б. выполнен комбинированием сохранённых в п.4 значений квадратурных компонент [8].

- в случае 2DPSK решающее правило выглядит как пара:

$$\text{Sign} (X_n X_{n+1} - Y_n Y_{n+1}) \quad \text{для } c_{n+1}; \quad (2)$$

$$\text{Sign} (Y_n X_{n+1} - X_n Y_{n+1}) \quad \text{для } d_{n+1}.$$

Где  $X_n$  и  $Y_n$  отсчеты квадратурных компонент поднесущей из  $n$ -го (референтного) символа;

То же для поднесущей из  $n+1$ -го символа.

7) Происходит дешифрация полученного символа и его передача в вышестоящий блок логики.

Для простоты и наглядности принцип построения демодулятора иллюстрируется аналоговой схемой, в реальности он д.б. реализован средствами ЦОС (цифровой обработки сигналов): интегратор в виде накапливающего сумматора, генерация опорных сигналов выполняется простейшими DDS, цифровые фильтры и т.д.

Применяемые в модеме виды модуляции, каждый по отдельности, хорошо изучены и определение характеристик помехоустойчивости, таких как символьная или битовая вероятность ошибки, приводятся в литературе [3, 4, 5, 8].

### 3. Помехоустойчивость гибридной модуляции (ГМ) при некогерентной демодуляции сигналов гибридной MFSK-2DPSK модуляции

Логика определения вероятностей ошибки в режиме ГМ работы OFDM-MFSK иллюстрируется на примере 4FSK-2DPSK. Главная особенность ГМ передачи и, соответственно демодуляция сигналов организованы в двух уровнях («ярусах»): «базовый» демодуляция MFSK и «надстройка» демодуляция DPSK. Событие появления ошибки при демодуляции ГМ сигнала представляет собой комплексную ситуацию, в которой алгоритмы демодуляции сигналов на каждом ярусе используются ровно те же самые, что и в случаях их демодуляции по отдельности, без учёта ГМ.

Величина вероятности символьной ошибки на «базовом» ярусе MFSK  $P_{Ms}$  м.б. определена без учёта результата демодуляции сигнала в «надстройке».

Согласно [3, 3.1] вероятности символьной и битовой ошибок соотносятся как

$$P_{Mb} = \frac{M}{2M - 2} P_{Ms}, \text{ что в нашем случае равно:}$$

$$P_{Mb} = \frac{2}{3} P_{Ms},$$

Но величина вероятности битовой ошибки демодулятора DPSK при ГМ, статистически связана с вероятностью  $P_{Ms}$ . Обозначив вероятность битовой ошибки для собственно дифференциальной фазовой модуляции как  $P_{Db}$ , определим  $P_H$  – вероятность появления ошибки при демодуляции символа ГМ через формулу полной вероятности события ошибки [10]. При этом необходимо учесть, что сигналы DPSK для демодуляции вычисляют разность фаз двух последовательных смежных интервала  $T_s$  принятого сигнала. Следовательно нужно рассматривать полную вероятность события ошибки для полной группы несовместимых событий:  $B_1 = B_{00}$ ,  $B_2 = B_{01}$ ,  $B_3 = B_{10}$ ,  $B_4 = B_{11}$ ; в обозначениях индексов событий  $B$  первая цифра относится к  $n$ -му «референтному» символу, а вторая к  $n+1$ -му «демодулируемому» MFSK символу.

Цифра 0 в индексах означает верное определение передаваемой частоты MFSK, а цифра 1 – ошибку.

Следовательно из теоремы сложения вероятностей несовместимых событий [10]:

$$P(A) = \sum_{i=1}^4 P(AB_i) = \sum_{i=1}^4 P(B_i)P(A/B_i), \quad (3)$$

где

$$P(B_1) = (1 - P_{Msn})(1 - P_{Ms(n+1)}),$$

$$P(B_2) = (1 - P_{Msn})P_{Ms(n+1)},$$

$$P(B_3) = P_{Msn}(1 - P_{Ms(n+1)}), P(B_4) = P_{Msn}P_{Ms(n+1)}$$

Подставляя в (3) значения сомножителей  $P(B_i)$  и учитывая, что  $P(A/B_1) = P_{Db}$ , а  $P(A/B_i) = \frac{1}{2}$ , для  $i = 2,3,4$ ; получаем, сохраняя в (3) слагаемые только первой степени содержащие

$$P_{MS}: P = P_{MSn}, P_1 = P_{MS(n+1)}, \quad P_H = P_{Db} - P_{Db} (P + P_1) + 1/2 (P + P_1)$$

при  $P = P_1$

$$P_H = P_{Db} + P - 2P_{Db}P.$$

Для иллюстрации полученных выше результатов рассмотрим случай 4FSK-2DPSK при передаче сигналов по каналам с постоянными параметрами:

Во-первых, канал с детерминированным коэффициентом передачи и аддитивным белым гауссовским шумом (АБГШ), в котором значения вероятности ошибки характеризуется единственным параметром: отношением сигнал/шум (SNR), которое обозначается как  $R$  и определяется отношением мощностей сигнала к шуму или эквивалентным ему отношением энергии сигнала к спектральной плотности мощности шума.

Вероятность символьной ошибки ортогональной 4FSK имеет вид [3]:

$$P(R) = 3/2 \exp(-R/2) - \exp(-2R/3) + 1/4 \exp(-3R/4)$$

Вероятность битовой ошибки в 2DPSK имеет вид [3]:

$$P_{2DPSK}(R) = Q(a, b) - 0,5I_0(a, b)\exp(-0,5(a^2 + b^2)) \quad (5)$$

где  $Q(a, b)$  – функция Маркума [10];  $I_0(ab)$  – модифицированная функция Бесселя 0 порядка.

$$a = \sqrt{0.293R}, b = \sqrt{1.707R}.$$

Во-вторых, канал с медленными общими релейскими замираниями, когда  $P_{4s}^{av}$  средняя вероятность ошибки в этом канале, это функция единственной переменной  $R_0$  – среднего отношения SNR :

$$R_0 = h_{av}^2 R,$$

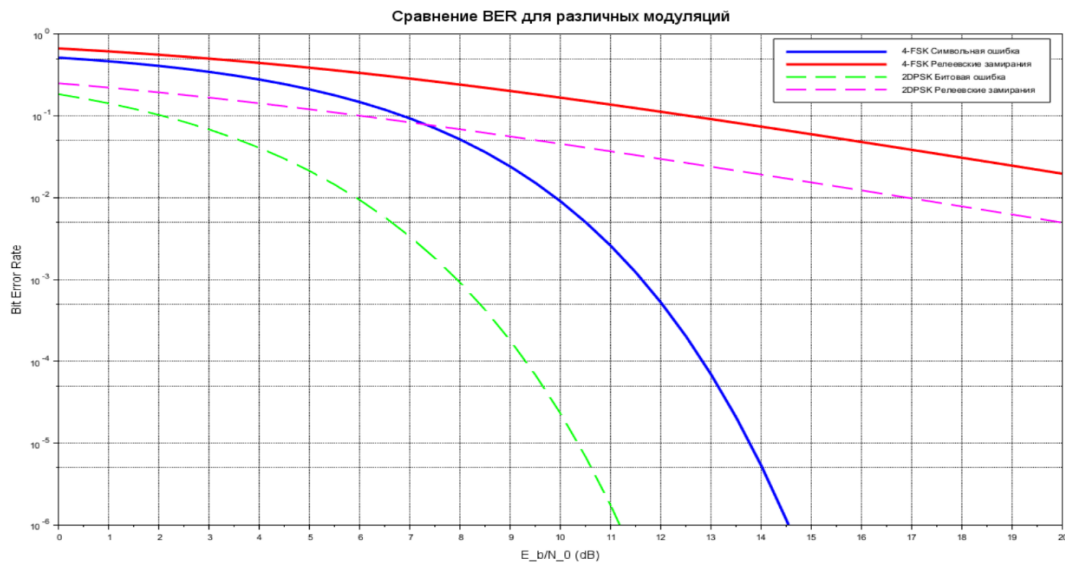
где  $h_{av}^2$  – среднее значение квадрата амплитуды релейского замирания.

Значение SNR имеет экспоненциальную плотность распределения, усредняя по этому закону вероятность (4) получаем:

$$P_{4s}^{av}(R_0) = 3\left(\frac{1}{2+R_0} - \frac{1}{3+2R_0}\right) + \frac{1}{4+3R_0}, \quad (6)$$

Среднее значение вероятности битовой ошибки для некогерентной демодуляции 2DPSK в релейском канале может быть представлена [9] как:

$$P_{2DPSK}^{av}(R_0) = \frac{1}{2} \left[ 1 - \frac{\sqrt{2R_0}}{\sqrt{1+4R_0+2R_0^2}} \right] \quad (7)$$



**Рис.5.** Характеристика вероятности ошибок 4FSK 2DPSK в каналах с АБГШ и общими релейскими замираниями

#### 4. Заключение

Таким образом, разработанная система представляет собой перспективное решение для построения энергоэффективных и надёжных, в силу простых алгоритмов работы малогабаритных терминалов радиосвязи, способных функционировать в условиях импортозамещения на удалённых и протяжённых трассах, заменяя изделия зарубежных фирм. Архитектура терминала ориентирована на широкомасштабное внедрение в состав низового уровня цифровой инфраструктуры в системах промышленного интернета вещей (IoT), мониторинга, телеметрии и автоматизированного управления без изменений в частотном планировании систем и сетей радиосвязи, в том числе повышая эффективность использования частотного диапазона до 800 МГц.

Предложенное решение способно обеспечить надёжную связь и широкую функциональность при массовом производстве и низкой себестоимости, что делает его крайне привлекательным для широкого круга применений в отечественной цифровой инфраструктуре рассмотренного выше профиля.

#### Литература

1. ETSI TS 103 175 V1.1.1 (2015-06) technical specification. Intelligent Transport Systems (ITS).
2. Системы цифровой подвижной радиосвязи (DMR). Ч. 1. Протокол радиоинтерфейса: СТБ ETSI TS 102 361-1/OP. 2010. 163 с.
3. Proakis J.G., Salehi M. Digital Communications. 5th ed. Boston: McGraw-Hill, 2008. 1170 p.
4. Лисюнак Н.И. и др. Теоретические основы цифровой радиосвязи : учеб. Пособие. Минск: БГУИР, 2012. 330 с.
5. Wetz M. Transmission Methods for Wireless Multi Carrier Systems in Time-Varying Environments. Dissertation. Universitet Ulm, 2011, p. 124.
6. A Technical Tutorial on Digital Signal Synthesis / Analog Devices, Inc. 1999. 122 p.
7. Елусеев С.Н. Передача сообщений в узкополосных сетях дальнего радиуса действия диапазона УКВ // Технологии информационного общества : сб. трудов МОИТК. Москва, 2019. С. 208-209.
8. Мелухов С.В. Методы манипуляции цифровой радиосвязи: учебное пособие. Томск: Томский гос.университет управления и радиоэлектроники, 2017. 65 с.
9. Guimaraes D., de Souza R. Exploring Practical Aspects of the FSK Modulation with Noncoherent Matched Filter Detection. Revista de Tecnologia da Informao e Comunicao, vol. 5. №1, 2015, pp. 22-28.
10. Гурский Е.И. Теория вероятностей с элементами математической статистики. М.: Высшая школа, 1971, 368 с.

## VISIBLE LIGHT COMMUNICATION (VLC): СВЯЗЬ С ПОМОЩЬЮ ВИДИМОГО СВЕТА

**Панкратов Денис Юрьевич,**  
МТУСИ, доцент, к.т.н., Москва, Россия  
[d.y.pankratov@mtuci.ru](mailto:d.y.pankratov@mtuci.ru)

**Фарах Абдимаджид Мохамед**  
МТУСИ, студент, магистр, Москва, Россия,  
[abdimajid.farah99@mail.ru](mailto:abdimajid.farah99@mail.ru)

### **Аннотация**

Связь с помощью видимого света (VLC) – это технология передачи данных без оптоволокна, основанная на видимом свете [1-3]. Одним из ключевых мотивов является тот факт, что свет может использоваться одновременно для освещения, связи и/или позиционирования. В свою очередь, благодаря этой функциональности, для передачи данных и определения местоположения не требуется дополнительный источник питания. Попытка заменить устаревшие источники света светодиодами может быть объединена с технологией VLC. В статье рассмотрены принципы работы VLC, технические подходы, преимущества, ограничения, существующие проблемы и возможные пути их преодоления. Также приводятся результаты компьютерного моделирования и математические модели системы VLC.

### **Ключевые слова:**

VLC, Модуляция, Оптическая беспроводная связь, On-off keying (OOK), Pulse position modulation (PPM).

### **Введение**

Рост числа беспроводных устройств и растущая плотность трафика создают серьезную нагрузку на радиочастотный спектр. Традиционные каналы связи – Wi-Fi, Bluetooth – испытывают ограничение по пропускной способности и подвержены помехам. На этом фоне технология связи с помощью видимого света (Visible Light Communication, VLC) представляет собой важную альтернативу: она использует светодиодное освещение как инфраструктуру для передачи данных, не конкурируя за радиочастотный ресурс [1, 2, 16-27]. Технология VLC открывает дополнительные ёмкие каналы связи и даёт новые возможности для создания безопасных и высокоскоростных сетей внутри помещений и в прикладных сценариях [2, 3, 4-15].

Система может работать в видимой части спектра, охватывающей от 400 ТГц ( $\lambda \approx 750$  нм) до 790 ТГц ( $\lambda \approx 380$  нм), как показано на рис. 1. Как видно из этого рисунка, видимый свет составляет лишь малую часть общего оптического спектра (который включает инфракрасный и ультрафиолетовый). В этих модуляция и демодуляция осуществляются напрямую, поскольку отсутствуют радиочастоты, что делает систему оптической передачи значительно проще, чем конкурирующие радиочастотные системы. Тем не менее, видимый свет остается наиболее доступной частью оптического спектра благодаря изобретению недорогого.

Светодиоды были изобретены в 1960-х годах. Всего за несколько десятилетий светодиоды прошли путь от одноцветных до многоцветных, от устройств с низкой яркостью до устройств с высокой яркостью, от устройств с коротким сроком службы до устройств с длительным сроком службы. Одна только яркость увеличивалась в 20 раз за десятилетие, в то время как цена снизилась до 1% от первоначальной цены. Однако концепция VLC была предложена лишь около двух десятилетий назад японскими учёными, которые предположили, что информация может быть закодирована в источнике света путём быстрого мерцания света на основе передаваемой информации [1-3].

К счастью, это мерцание не различимо человеческим глазом, если частота мерцания составляет не менее 200 Гц. Это позволяет легко интегрировать светодиоды VLC с осветительными светодиодами. Первый стандарт VLC, называемый LiFi (Light Fidelity), был представлен только в 2011 году [8, 14].

С момента своего изобретения концепция VLC прошла долгий путь развития, и к 2019 году скорость передачи данных превысила 15 Гбит/с.. сообщили о скорости передачи данных 15,73 Гбит/с по каналу длиной 1,6 м с использованием OFDMA в качестве схемы доступа, используя только стан-

дартные светодиоды. сообщили, что соединения со скоростями более 6,5 и 1,5 Гбит/с могут поддерживаться на расстоянии 10 и 20 м соответственно.

Несмотря на многочисленные преимущества VLC, о которых говорилось во введении к этой главе, VLC также сталкивается с рядом проблем. Следует отметить, что чем чаще мерцает светодиод, тем ярче он становится. Это может стать проблемой по двум причинам: во-первых, увеличивается энергопотребление, а во-вторых, если тот же светодиод используется для освещения, излучаемый свет может быть слишком ярким для необходимого пространства [1, 2].

В этом случае необходимо применять различные методы диммирования светодиодов. Другая проблема – помехи от других источников света (как искусственных, например, ламп накаливания, так и естественных, например, солнечного света). Наличие других источников света воспринимается системой как шум, что приводит к снижению скорости передачи данных и увеличению (BER) коэффициента Битовых ошибок. К счастью, было доказано, что полосовые синие фильтры связь ограничивают деградацию, вызванную солнечным излучением. Наконец, интенсивность света резко падает с расстоянием, что может ограничивать возможности сценариев развертывания.

### 1. Структурная системы VLC

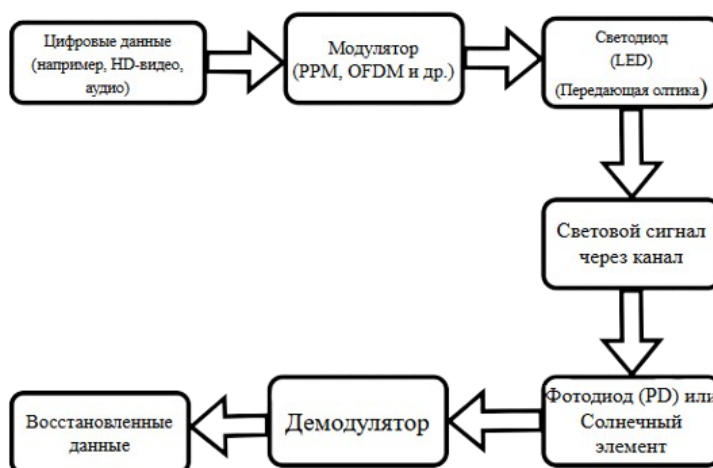


Рис. 1. Структурная схема системы VLC

Базовая структурная схема системы VLC включает в себя передатчик (Transmitter) и приемник (Receiver). Ниже представлена схема, иллюстрирующая этот процесс.

#### *Передатчик*

Передатчик предназначен для преобразования входных электрических данных в оптический сигнал, который излучается светодиодом (или светодиодной матрицей) или лазерным диодом. Модуляция, по сути, представляет собой преобразование сигнала данных  $m(t)$  в ток возбуждения светодиода (или лазерного диода), создавая сигнал изменяющейся во времени интенсивности света  $x(t)$ . Этот процесс также известен как модуляция интенсивности света. Этот сигнал передается по оптическому каналу для приема фотодетектором. Ток возбуждения должен находиться в пределах динамического диапазона светодиода, чтобы не исказить световой сигнал [1, 2].

Также необходимо, чтобы управляющий сигнал был действительным и неотрицательным. На рисунке 2 также показан блок управления диммированием, который используется для точной регулировки яркости светодиода до необходимого уровня.

Диммирование используется как минимум по двум причинам. Во-первых, оно используется для уменьшения яркости светодиода при высокой скорости передачи данных и приведения результирующей яркости в соответствии с требованиями к освещенности в заданных условиях. Во-вторых, оно может помочь увеличить время отклика светодиода [1-3].

Светодиоды предпочтительнее лазерных диодов в помещениях, отчасти из-за их более низкой стоимости и большого поля зрения, а отчасти потому, что их также можно использовать для освещения. Светодиоды могут быть монохромными (излучающими только один цвет, обычно синий, зеленый или красный) или белыми (теоретически содержащими все цвета одновременно).

VLC обычно устанавливается с помощью белого света, который может быть получен тремя способами:

1) В первом методе красный, зеленый и синий свет (RGB) могут излучаться с заданной интенсивностью.

2) Второй метод немного сложнее и предполагает использование синего светодиода с люминофорным покрытием, излучающим желтый свет. Таким образом, короткие длины волн поглощаются, и излучается желтый свет. На следующем этапе обработки света длина волны смещается в красную сторону, которая комбинируется частью синего света, который не поглощается. В конечном итоге это приводит к белому свету со спектром. Этот метод более популярен, чем метод RGB, но он даёт свет с ограниченной полосой пропускания из-за медленного поглощения и испускания люминофорным слоем.

3) В третьем методе генерируется широкополосное излучение, очень похожее на солнечный спектр.

Оптическая форма светодиода также важна. Обычно рассматривается несколько вариантов реализаций светодиода [2].

> Прямой подход, когда свет светодиода излучается без прохождения через оптическое устройство;

> Диффузионный подход, когда свет рассеивается для уменьшения поверхностной яркости и расширения диапазона освещения;

> Отражательный подход, когда свет от светодиода направляется через внешние отражатели;

> Пропускающий подход, когда перед светодиодом добавляется линза для изменения контурной карты света; и

> Сочетание отражательного и пропускающего подходов.

Существует ряд проблем, связанных со светодиодными передатчиками [2]. К ним относятся преодоление нелинейности светодиодов, необходимость точного управления цветностью светодиодов, а также ранее упомянутые требования к управлению яркостью и передаче данных без мерцания. Таким образом, силовая электроника, связанная с управлением светодиодами, играет решающую роль в контролируемой передаче сигнала VLC.

### **Приемник**

Оптический приёмник основан на фотодетекторе. Фотодетектор принимает переданный сигнал  $x(t)$ , прошедший через канал с откликом  $h(t)$ , создавая фототок  $y(t)$ .

Другими важными блоками приёмника являются оптический концентратор, который обеспечивает отражение и фокусировку принятого света на фотодетекторе, и оптический фильтр, фильтрующий нежелательные длины волн. Также показано, что оптический фильтр может быть частью оптического концентратора. В приёмнике обычно требуется электронный усилитель для преобразования детектируемого тока для дальнейшей обработки в последующих блоках приёмника.

Существует как минимум три типа фотодетекторов: фотодиоды, датчики изображений и камеры, а также солнечные панели. Среди них наиболее распространены фотодиоды. В коммерческих системах VLC обычно используются два типа фотодиодов: PIN-диоды и лавинные фотодиоды (APD). Хотя APD – диоды имеют более высокий коэффициент усиления, чем PIN-диоды, они страдают от более высокого дробового шума. С другой стороны, PIN-диоды недороги и обладают более высокой температурной стойкостью. Однако два других типа фотодетекторов также имеют преимущества. Например, солнечные панели можно одновременно использовать для сбора энергии, в то время как датчики камер, как правило, уже доступны во многих устройствах, таких как мобильные телефоны, и, следовательно, их использование в VLC потребует лишь минимальных затрат [1, 2].

## 2. Канал VLC и модель распространение сигнала

Оптические линии распространения можно разделить на две категории: линии прямой видимости (LOS) и линии с отсутствием прямой видимости (nLOS). Из-за низкой скорости отражения света линии прямой видимости (LOS) обладают гораздо большей энергоэффективностью, а количество мощности, отраженной более одного раза, пренебрежимо мало. Однако в закрытых помещениях обычно можно найти хотя бы один отраженный путь, что означает, что сигналы могут быть обнаружены при наличии препятствий. Линии распространения можно также классифицировать по направленности передатчика и приемника. И передатчик, и приемник могут быть направленными или ненаправленными. Сценарии, когда один из них направленный, а другой – нет, приводят к так называемым гибридным линиям. Если одновременно учитывать наличие прямой видимости (LOS), можно выделить восемь типов линий:

- линии прямой видимости (LOS) /направленная связь;
- линии прямой видимости (LOS) /ненаправленная связь;
- линии прямой видимости (LOS) /гибридная связь, где передатчик направленный, а приемник – нет;
- линии прямой видимости (LOS) /гибридная связь, где приемник направленный, а передатчик – нет;
- nLOS/направленная связь;
- nLOS/ненаправленная связь;
- nLOS/гибридная связь, где передатчик направленный, а приемник – нет;
- nLOS/гибридная связь, где приемник направленный, а передатчик – нет;

Одно из основных различий между радиочастотными и оптическими системами заключается в том, что радиочастотные системы подвержены многолучевому замираниям, в то время как оптические системы не подвержены ему. Это связано с тем, что физическая область обнаружения фотодиода значительно больше квадрата длины волны падающего света. Оптические системы, особенно направленные наружные системы, с другой стороны, гораздо более подвержены ошибкам наведения и потерям наведения.

Коэффициент затухания (VLC) можно смоделировать с помощью величины затухания светового сигнала при распространении от передатчика и приемнику. Как уже упоминалось, возможны только два пути: прямой канал и канал с однократным отражением. Затухание в канале VLC можно смоделировать с помощью следующей модели. Обобщённый закон Ламберта можно применить к стороне передатчика, который показывает, что интенсивность излучаемого света зависит от косинуса угла  $\phi$  между излучаемым светом и нормалью к поверхности светодиода. Тогда, чтобы рассчитать затухание в линии, сначала необходимо определить показатель Ламберта как

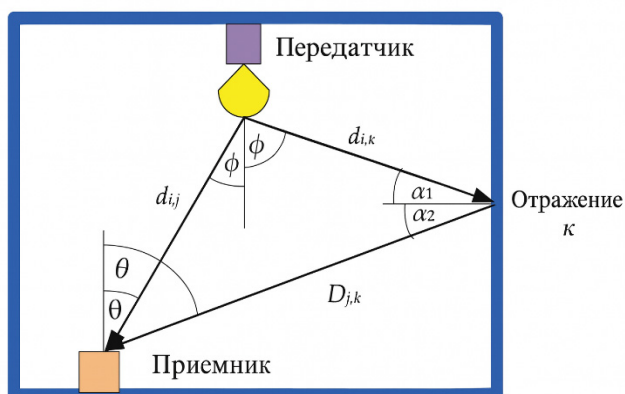


Рис. 2. Принцип распространения оптических волн с учетом прямо луча и отраженно луча [1]

$$m = \frac{-1}{\log_2(\cos \theta_{1/2})} \quad (1.1)$$

где  $\theta_{1/2}$  — угол излучения светодиода по половинной интенсивности. На стороне приёмника коэффициент усиления оптического концентратора равен

$$f(\theta) = \begin{cases} \theta \frac{n^2}{\sin^2 \Theta}, & 0 \leq \theta \leq \Theta, \\ 0, & \theta > \Theta \end{cases} \quad (1.2)$$

Где  $n$  – показатель преломления, а  $\Theta$  – угол поля зрения фотодиода приёмника. Тогда для прямой связи усиление постоянного тока (которое меньше 1, и, по сути, затухание) можно выразить как

$$h_{i,j} = \frac{A_p(m+1)}{2\pi d_{i,j}^2} \cos^m \phi g_{of}(\theta) f(\theta), \quad (1.3)$$

где:  $A_p$  – физическая площадь фотодиода,  $d_{i,j}$  – расстояние между передатчиком и приёмником, а  $g_{of}$  – коэффициент усиления оптического фильтра. При  $\theta > \Theta$  прямой видимости нет, и коэффициент усиления по постоянному току равен нулю.

Для отраженной линии коэффициент усиления по постоянному току можно определить по формуле

$$dh_1 = \frac{A_p(m+1)}{2\pi d_{i,k}^2 d_{j,k}^2} \rho dA_s \cos^m \phi_r \cos \alpha_1 \cos \alpha_2 g_{of}(\theta_r) f(\theta_r) \cos \theta_r, \quad (1.4)$$

где  $d_{i,k}$  – расстояние от передатчика до отражающей поверхности,  $d_{j,k}$  – расстояние от отражающей поверхности до приемника,  $\phi_r$  и  $\theta_r$  – углы, соответствующие отраженному звену,  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – углы падения и облученности в точке отражения и, наконец,  $\rho$  и  $dA_s$  – коэффициент отражения и отражаемая площадь.

### 3. Емкость и пропускная способность канала VLC

Радикальные различия между Радиочистотными системами и VLC означают, что пропускная способность канала VLC не соответствует пропускной способности канала Шеннона. По-видимому, существуют два ограничения на пропускную способность канала: требование к неотрицательным действительным сигналам и средняя интенсивность света для безопасности для глаз. Кроме того, необходимо учитывать требования к освещенности среды, в которой развернута система VLC, и динамический диапазон светодиодов. К сожалению, аналитического выражения для пропускной способности канала с учетом ограничений средней и пиковой мощности не существует, и можно найти только границы пропускной способности (нижнюю и верхнюю).

Границы различаются в зависимости от выбранных ограничений, и представление различных альтернативных ограничений пропускной способности [1, 2].

Альтернативной метрикой, которую можно рассматривать в VLC, является пропускная способность канала, которая рассчитывает фактическую скорость передачи данных. Пропускная способность Установлено, что принцип OFDM, широко используемый для радиочастотных систем, также применим в VLC. Пропускная способность, для одного пользователя при использовании OFDM, может быть рассчитана по формуле:

$$X_j = \frac{W}{\beta L} \sum_{i=1}^{\beta L - 1} \eta_i \quad (1.5)$$

где  $W$  – ширина полосы сигнала,  $L$  – количество поднесущих,  $\beta$  – константа, зависящая от типа используемого сигнала OFDM (обычно  $\beta = 0,5$ ), а  $\eta$  – константа эффективности поднесущих, учитывающая влияние схемы модуляции, схемы кодирования и принятого отношения сигнал/шум.

#### 4. Методы модуляции для VLC

Передачики VLC, как и радиочастотные передачики, требуют модуляции сигнала для его передачи по беспроводному каналу. Однако существует одно принципиальное отличие между модуляцией в оптической области и модуляцией в радиочастотной области. В то время как в радиочастотной области модуляция подразумевает преобразование частоты, фазы и амплитуды сигнала, в оптической области можно изменять только интенсивность света, излучаемого светодиодом. Для VLC рассматривается несколько групп схем модуляции. Этих схемы модуляции имеют некоторое сходство со схемами радиочастотной модуляции.

Схема модуляции для конкретной системы VLC обычно выбирается на основе нескольких критериев:

- энергоэффективность;
- эффективность использования полосы спектра;
- надежность передачи;
- сложность;
- устойчивость к внешним источникам света.

Кроме того, все схемы модуляции требуют длинных серий из 0 и 1, которые могут вызывать мерцание независимо от скорости передачи данных. К счастью, RLL. Необходимо обеспечивать восстановление данных и тактовую синхронизацию.

Схемы модуляции для VLC включают:

- OOK (On-off keying).
- Амплитудно-импульсную модуляцию, Pulse Amplitud Modulation (PAM).
- Позиционно-импульсную модуляцию, Pulse position modulation (PPM).
- Интервально-импульсную модуляцию, Pulse-interval modulation (PIM).
- Широотно-импульсную модуляцию, Pulse-width modulation (PWM).

##### Модуляция OOK (On-Off Keying)

OOK – самая простая (и самая медленная) схема модуляции. В OOK светодиод горит, если передаваемый сигнал – двоичная 1, и выключен, если передаваемый сигнал – двоичный 0. Иногда вместо полного отсутствия сигнала в состоянии 0 светодиод просто излучает свет другой интенсивности. Если данные кодируются в несколько уровней интенсивности или амплитуды света, достигается модуляция PAM. Концепция PAM в контексте VLC очень похожа на PAM в радиочастотном диапазоне.

Математически сигнал VLC можно выразить как:

$$s(t) = \begin{cases} A_c \cos(2\pi f_c t), & \text{если} \\ 0, & b(t)=1 \\ & b(t)=0 \end{cases} \quad (1.6)$$

где:  $A_c$  – амплитуда несущей,  $f_c$  – частота несущей,  $b(t) \in \{0,1\}$  – двоичный информационный сигнал.

#### 5. Моделирование и анализ характеристик системы VLC

В результате моделирования были получены графики зависимости числа битовых ошибок (Bit Error Rate, BER) от отношения сигнал/шум (Signal-to-Noise Ratio - SNR). Моделирование осуществлялось с использованием модуляции OOK. Было проведено 3000 экспериментов, при диапазоне ОСШ от 1 до 15 дБ, с шагом 1 дБ. В программе использовался линии прямой видимости (LOS) канал связи. При этом модуляция OOK соответствует сценарию VLC в условиях LOS. На рисунке 8 показаны результаты моделирования и теоретические кривые BER.

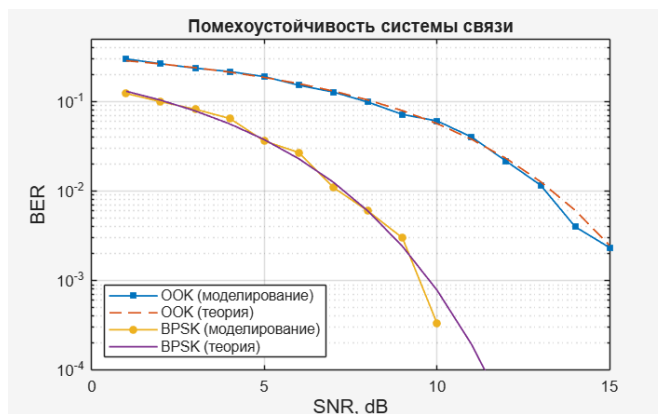


Рис. 3. Помехоустойчивость системы связи

Из графиков, показанных на рисунке 8 видно, что с увеличением SNR помехоустойчивость системы VLC улучшается медленнее. При BER=10<sup>-1</sup> выигрыш при модуляции BPSK составляет 6 дБ по сравнению с OOK, т.е. для системы VLC требуется более высокие энергетические затраты по сравнению с традиционной системой радиосвязи, и дальность связи ограничена, обычно несколькими метрами.

Анализ графиков вероятности ошибки на рисунке 2 позволяет сделать следующие выводы о работе системы связи, использующей модуляцию OOK (On-Off Keying) в сценарии Visible Light Communications (VLC), в сравнении с классической схемой BPSK.

Во-первых, наблюдается значительное отставание помехоустойчивости OOK от схемы BPSK. Это является ожидаемым и теоретически обоснованным, поскольку BPSK как фазовая модуляция обладает более высокой энергетической эффективностью и устойчивостью к шумам по сравнению с амплитудной модуляцией OOK. Например, для достижения вероятности ошибки BER порядка  $(10^{-3})$  системе с OOK требуется значение SNR примерно на 5-6 дБ выше, чем системе с BPSK. Этот энергетический проигрыш является платой за простоту реализации OOK, что особенно актуально для систем VLC, где часто используются недорогие светодиоды и фотоприемники.

Во-вторых, важно отметить близкое соответствие теоретических и экспериментальных (моделированных) кривых для обеих модуляций. Это свидетельствует о высокой точности проведенного моделирования и адекватности используемых математических моделей канала связи. Небольшое расхождение между кривыми "OOK (моделирование)" и "OOK (теория)" в области средних SNR может объясняться учетом в модели реальных дестабилизирующих факторов, характерных для оптического канала, таких как многолучевое распространение, шумы фотодетектора и нелинейность передатчика, которые не учитываются в базовой теоретической модели.

Таким образом, можно заключить, что хотя модуляция OOK и уступает BPSK по энергетической эффективности, ее использование в системах VLC оправдано с точки зрения простоты и стоимости реализации. Полученные данные надежно подтверждают теоретические предпосылки и позволяют использовать данную модель для дальнейшего проектирования и оптимизации конкретных систем оптической беспроводной связи.

### Преимущества VLC

- Значительный спектральный ресурс: видимый диапазон фактически не лицензируется и имеет высокий потенциал для передачи данных, что позволяет теоретически достигать гигабитных скоростей при хорошем оборудовании.
- Безопасность и приватность: свет не проникает через непрозрачные преграды, что ограничивает зону покрытия и снижает риск перехвата сигнала извне.
- Отсутствие радиопомех: эксплуатация VLC возможна в средах, где RF-излучение нежелательно или запрещено (медицинские учреждения, авиация, промышленные объекты).
- Двойное назначение: LED-светильники выполняют функции освещения и передачи данных одновременно, что улучшает энергоэффективность и экономику решений.

- Высокая точность позиционирования: локализация с использованием световых маяков обеспечивает сантиметровую точность, полезную для навигации внутри помещений и контекстных сервисов.

## 6. Ограничения и пути их преодоления

Основные ограничения VLC и возможные решения:

Требование прямой видимости (LoS): снижает скорость при отсутствии прямого пути. Решение: применение многолучевых приемников, распределенных точек доступа и технологий оптического MIMO.

Влияние фонового освещения: создает шум в приемнике. Решение: использование оптических фильтров, узкополосных приемников и адаптивных алгоритмов цифровой обработки сигнала.

Проблема обратного канала (uplink): сложность передачи от мобильных устройств. Решение: гибридные архитектуры (VLC на прием / RF или ИК-канал на передачу) и технологии оптического обратного рассеяния (backscatter).

Обеспечение мобильности: необходимость бесшовного переключения между источниками света. Решение: интеллектуальные системы управления с механизмами хэндовера.

Совместимость с освещением: модуляция не должна вызывать заметное мерцание. Решение: специальные схемы модуляции и алгоритмы диммирования, соответствующие стандартам качества света.

## 7. Области применения, ограничения, практическое применение

Системы VLC применяются во многих областях деятельности человека, например [1-4]:

- Li-Fi в офисах и образовательных учреждениях: высокоскоростной доступ в локальной сети, где каждая лампа становится точкой доступа; полезно для конфиденциальных корпоративных сетей и учебных лабораторий.
- Медицина: передача данных в палате интенсивной терапии при минимальном RF-воздействии на медицинское оборудование; безопасный обмен данными между устройствами мониторинга и центральной системой.
- Автотранспорт (V2V и V2I): использование фар и стоп-сигналов для обмена краткими сообщениями между автомобилями – предупреждения о торможении, информация для автономных систем управления.

## Заключение

Visible Light Communication (VLC) представляет собой перспективную технологию, дополняющую традиционные беспроводные системы в условиях перегруженности радиочастотного спектра. Её ключевые преимущества – высокая безопасность данных, отсутствие электромагнитных помех, возможность точного позиционирования и двойное назначение (освещение и передача данных) – делают VLC особенно востребованной в медицине, промышленности, логистике и защищённых корпоративных сетях. Перспективы VLC связаны с интеграцией в гибридные сети следующего поколения (6G), миниатюризацией компонентов и развитием стандартизации. В ближайшие годы технология будет внедряться в нишевые области, а в долгосрочной перспективе станет частью инфраструктуры умных городов, расширяя возможности связи и создавая основу для новых сервисов.

## Литература

1. Wang C.-L., Chatzimisios P. Visible Light Communications for 6G // Mobile Communication Networks: 5G and a Vision of 6G / ред. R. Tafazolli. Cham: Springer, 2021. Гл. 5. С. 103-126. (Lecture Notes in Electrical Engineering; T. 751). DOI: 10.1007/978-3-030-69273-5\_5.
2. Хоэп П. А. Visible Light Communications: Theoretical and Practical Foundations. Берлин: Springer, 2019. 320 с. DOI: 10.1007/978-3-030-17665-9.
3. Кумар А., Шаран Н., Горан С. К. Visible Light Communications. Нью-Йорк : Nova Science Publishers, Inc., 2023. 285 с. DOI: 10.52305/RYSER7275.
4. Прокус Дж. Г., Салехи М. Цифровая связь: пер. с англ. 5-е изд. М.: МакГроу-Хилл, 2008. 1136 с.
5. Гупта С. Освещая будущее: всесторонний обзор видимой световой связи // Optical and Quantum Electronics. 2024. Т. 56, № 7. Статья № 105342. С. 1-28. DOI: 10.1016/j.oqe.2024.105342.

6. *О'Брайен Д., Минь Х. Л.* Связь с помощью видимого света: теория и применение : пер. с англ. М.: Издательский дом МТУСИ, 2023. 320 с. Ориг. изд.: O'Brien D.C., Minh H.L. Visible Light Communications: Theory and Applications. Cambridge: Cambridge University Press, 2019.
7. *Миранда Р. Ф., Перейра Р. И. С., Дарли Д. М., Суза М. Дж., Томс Г. К., Мюллер И., Афонсу В. А.* Обзор когнитивных гибридных систем радиочастота / видимая световая связь для беспроводных сенсорных сетей // *Sensors*. 2023. Т. 23, № 8. Статья № 3842. С. 1-31. DOI: 10.3390/s23083842.
8. *Бешедица Т., Пеянович М., Савич З.* Эволюция гибридных сетей LiFi-WiFi: обзор // *Electronics*. 2023. Т. 12, № 15. Статья № 3256. С. 1-25. DOI: 10.3390/electronics12153256.
9. Теоретический обзор видимой световой связи // *International Journal of Data and Communication Research*. 2024. Т. 5, № 2. С. 45-59.
10. Новая OFDM-система GSM с квадратурной модуляцией во временной области для видимой световой связи // *Electronics*. 2024. Т. 13, № 10. Статья № 1876. С. 1-15. DOI: 10.3390/electronics13101876.
11. Достижения и проблемы видимой световой связи в приложениях для интеллектуальных транспортных систем (ITS) // *Photonics*. 2024. Т. 11, № 3. Статья № 245. С. 1-21. DOI: 10.3390/photonics11030245.
12. Био-вдохновленные методы оптимизации для сетей видимой световой связи // *Optical Switching and Networking*. 2025. Т. 48. Статья № 101042. DOI: 10.1016/j.osn.2025.101042.
13. Использование оптической OFDM-модуляции в системе передачи данных VLC на синих светодиодах // *IEEE Access*. 2024. Т. 12. С. 57431-57445. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3456221.
14. *Элтоххи М., Абдельхамид А. А., Абделькадер Х. К., Айяд М. А.* Интеграция технологий Wi-Fi, Li-Fi и BPL для защищенных беспроводных сетей // *Sensors*. 2024. Т. 24, № 6. Статья № 1123. С. 1123-1139. DOI: 10.3390/s24061123.
15. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks – Part 15.7: Short-Range Optical Wireless Communications. – IEEE Std 802.15.7-2018 (Revision of IEEE Std 802.15.7-2011). Нью-Йорк: IEEE, 2018. 407 с. DOI: 10.1109/IEEESTD.2018.8697198.
16. *Крейнделин В.Б., Варукина Л.А.* Проблема справедливого распределения мощности в системе PD-нома // *T-Comm: Телекоммуникации и транспорт*. 2025. Т. 19, № 12. С. 25-33. DOI 10.36724/2072-8735-2025-19-12-25-33. EDN YWTKAI.
17. *Bakulin M.G., Kreyndelin V.B., Reznev A.A.* Analysis of selection criteria for vector channels or orthogonal precoding matrices in communication systems with multiplexing // *T-Comm: Телекоммуникации и транспорт*. 2025. Vol. 19, No. 4, pp. 57-66. DOI 10.36724/2072-8735-2025-19-4-57-66. EDN BJRHHU.
18. *Бакулин М.Г., Бен Режеб Т.Б.К., Крейнделин В.Б.* и др. Пространственная модель канала с кластеризованной линией задержки (CDL) для перспективных систем MIMO // *T-Comm: Телекоммуникации и транспорт*. 2025. Т. 19, № 8. С. 38-48. DOI 10.36724/2072-8735-2025-19-8-38-48. EDN GERBWW.
19. *Крейнделин В.Б., Варукина Л.А.* Обработка и прекодирование сигналов в системе с неортогональным до-ступом и с разделением по мощности // *T-Comm: Телекоммуникации и транспорт*. 2024. Т. 18, № 6. С. 38-45. DOI 10.36724/2072-8735-2024-18-6-38-45. EDN CMVGXV.
20. *Bakulin M.G., Kreyndelin V.B., Khazov M.L.* New quasi-optimal algorithms of antenna selection with low complexity // *T-Comm: Телекоммуникации и транспорт*. 2023. Vol. 17, No. 7, pp. 47-56. DOI 10.36724/2072-8735-2023-17-7-47-56. EDN SAQTDM.
21. *Бакулин М. Г., Бен Режеб Т. Б. К., Крейнделин В. Б.* и др. Схемы модуляции для систем сотовой связи 5G/IMT-2020 и 6G // *T-Comm: Телекоммуникации и транспорт*. 2022. Т. 16, № 3. С. 11-17. DOI 10.36724/2072-8735-2022-16-3-11-17. EDN MXYOEW.
22. *Бакулин М. Г., Бен Режеб Т. Б. К., Крейнделин В. Б.* и др. Схемы NOMA с обработкой на уровне символов // *T-Comm: Телекоммуникации и транспорт*. 2022. Т. 16, № 5. С. 4-14. DOI 10.36724/2072-8735-2022-16-5-4-14. EDN NVXWQX.
23. *Бакулин М. Г., Бен Режеб Т. Б. К., Крейнделин В. Б., Смирнов А. Э.* Способы минимизации объёма передаваемой информации в обратном канале многоантенных систем MIMO // *T-Comm: Телекоммуникации и транспорт*. 2021. Т. 15, № 3. С. 17-24. DOI 10.36724/2072-8735-2021-15-3-17-24. EDN HNJPPF.
24. *Бакулин М. Г., Крейнделин В. Б., Панкратов Д. Ю.* Применение технологии MIMO в современных системах беспроводной связи разных поколений // *T-Comm: Телекоммуникации и транспорт*. 2021. Т. 15, № 4. С. 4-12. DOI 10.36724/2072-8735-2021-15-4-4-12. EDN FPZEGW.
25. *Крейнделин В. Б., Фриск В. В., Степанова А. Г.* Моделирование электрических процессов на персональном лабораторном стенде // *Методические вопросы преподавания инфокоммуникаций в высшей школе*. 2023. Т. 12, № 1. С. 72-75.
26. *Панкратов Д. Ю., Пахомова А. В.* Применение технологии MIMO для улучшений характеристик физического уровня беспроводных сетей Wi-Fi // *Научные технологии в космических исследованиях Земли*. 2024. Т. 16, № 3. С. 55-61. DOI 10.36724/2409-5419-2024-16-3-55-61. EDN UEAEIZ.
27. *Панкратов Д.Ю., Пахомова А.В., Пронина Е.Д.* Моделирование технологий MIMO и WSMA для систем радиосвязи // *Научные технологии в космических исследованиях Земли*. 2025. Т. 17, № 1. С. 36-44. DOI 10.36724/2409-5419-2025-17-1-36-44. EDN GWZTBD.

## АЛГОРИТМ ВОССТАНОВЛЕНИЯ БИНАРНОГО ДЕРЕВА ИСХОДЯ ИЗ КОЛИЧЕСТВА И ВЕСА ЛИСТОВЫХ ВЕРШИН

**Рулев Денис Владиславович,**

*МТУСИ, студент группы БСТ2201, Москва, Россия*

[diry228all@mail.ru](mailto:diry228all@mail.ru)

**Гадасин Денис Вадимович,**

*МТУСИ, доцент, зам. зав. кафедрой СИТус, к.т.н., Москва, Россия*

[dengadiplom@mail.ru](mailto:dengadiplom@mail.ru)

**Савин Всеволод Артёмович,**

*МТУСИ, аспирант группы АФ2401(15), Москва, Россия*

[savin.vsevolod@icloud.com](mailto:savin.vsevolod@icloud.com)

**Косенок Иван Игоревич**

*МТУСИ, студент группы БСТ2201, Москва, Россия*

[kosenoki213@gmail.com](mailto:kosenoki213@gmail.com)

### **Аннотация**

*Структуры типа дерева применяются в задачах, связанных с поиском информации. Одной из главных характеристик дерева является его стоимость, чем меньше стоимость – тем короче путь средняя длина пути от вершины до листа. Одним из широко применяемых алгоритмов для построения оптимального дерева является алгоритм Хаффмана. В работе предлагается алгоритм, позволяющий строить почти оптимальные деревья количество вершин на каждом уровне определяется на основании строгих формул, тем самым обеспечивая выигрыш во времени построения дерева, в задачах, где структура деревьев меняется довольно часто, за счет проигрыша во времени поиска.*

### **Ключевые слова:**

*почти оптимальные деревья, алгоритм Хаффмана, стоимость дерева, длина пути, формула построения дерева.*

### **Введение**

Бинарные деревья являются одной из фундаментальных структур данных в информатике и широко используются для решения множества вычислительных задач, например: задачи поиска информации, кластеризации, балансировки нагрузки, запросы – обход дерева, нахождение минимального по значению элемента, нахождение максимального по значению элемента, нахождение следующего по значению элемента, нахождение предыдущего по значению элемента, поиск узла с заданным значением ключа, а также операции, обновляющие BST – вставка и удаление узла [1-4]. Это иерархическая структура, состоящая из узлов, где каждый узел имеет не более двух потомков – обычно называемых левым и правым дочерними узлами. Благодаря своей эффективности в операциях поиска, вставки и удаления, бинарные деревья легли в основу более сложных структур, таких как бинарные деревья поиска (BST), двоичные кучи (binary heaps) и AVL-деревья, которые нашли применение в базах данных, файловых системах, компиляторах и алгоритмах сжатия данных [5].

Классические алгоритмы построения бинарных деревьев часто ориентированы на конкретные свойства, например, на порядок обхода или балансировку [6-8]. Однако в ряде практических задач, особенно при анализе вычислительной сложности или проектировании сетей, известна не сама структура дерева, а лишь его внешние характеристики. Одной из таких нетривиальных характеристик является распределение листовых вершин (листьев) по уровням. Листовой узел – это узел, не имеющий потомков, и его расположение в дереве критически важно для понимания таких свойств, как глубина дерева и сбалансированность.

Данная работа посвящена алгоритму построения бинарного дерева по известному количеству листовых вершин на каждом уровне [9, 10]. Эта задача представляет значительный теоретический и практический интерес, так как позволяет восстановить возможную структуру дерева, исходя лишь из ограниченной информации о его внешних узлах.

### Описание алгоритма

Алгоритм принимает на вход массив чисел, соответствующих количеству листьев на  $i$ -ом уровне. Но так как дерево может состоять из большого количества уровней, а верхние уровни как правило не содержат листовых вершин, массив начинается с первого уровня, содержащего листья, а его индекс передается отдельным параметром. Например: вместо  $[0, 0, 0, 0, 0, 2, 1, 4]$  передается  $([2, 1, 4], 5)$ . Возвращает алгоритм построенное дерево в виде ссылки на корневую вершину.



Рис. 1. Блок-схема алгоритма построения бинарного дерева по заданному количеству листовых вершин

В нашем случае рассматриваются деревья, структура которых предсказывается на основе формул с целью избежать применения алгоритма Хаффмана при каждом перестроении дерева, так как это привело бы к большим временным и вычислительным затратам, данный алгоритм возможно использовать в задачах с работой с текстовой информацией [11-13]. Из-за особенностей алгоритма Хаффмана у получившегося дерева не может быть нечетного количества листовых вершин на нижнем уровне, но оно может возникнуть при построении по формулам, поэтому в нашем алгоритме так же производится коррекция структуры дерева с целью гарантировать то, что на нижнем уровне всегда будет четное количество вершин.

Основные шаги алгоритма:

1. Устранение нечетного количества вершин на нижнем уровне
2. Цикл по уровням снизу вверх:
  - a. Добавление в массив листовых вершин
  - b. Добавление вершин для присоединения вершин с предыдущего уровня
  - c. Проверка на количество вершин на уровне

### Устранение нечетного количества вершин на нижнем уровне

В начале из массива удаляются сведения о несуществующих уровнях – нули в конце. Затем, если на самом нижнем уровне количество листовых вершин нечетное, одна из таких вершин переносится на уровень выше. При этом, если эта вершина была единственной, уровень фактически будет удален из дерева – в таком случае функция вызывается рекурсивно, чтобы проверить уже следующий уровень дерева, который теперь стал самым нижним.

### Построение дерева по количеству листовых вершин на уровнях

Переходим к основной части алгоритма. Для начала вызывается определенная ранее функция устранения нечетного количества листовых вершин на нижнем уровне. Затем запускается цикл по уровням дерева, начиная с самого нижнего. Для каждого уровня иницируется массив вершин для этого уровня, в него добавляются листовые вершины в количестве, определенном входными данными. Также в массив добавляется  $\left\lceil \frac{N_{i+1}}{2} \right\rceil$  вершин, где  $N_{i+1}$  – количество вершин на предыдущем уровне. К каждой из этих вершин в качестве потомков добавляется по 2 вершины с предыдущего уровня (в случае, если на предыдущем уровне количество вершин нечетное, у одной из новых вершин будет только один потомок). Затем идет проверка количества вершин по неравенству (1).

$$N_i \leq 2^i, \tag{1}$$

Где  $N_i$  – количество вершин на уровне;  $i$  – индекс уровня.

Если неравенство соблюдается, то цикл продолжается, массив вершин текущего уровня становится массивом вершин предыдущего уровня, программа переходит к следующему уровню. Иначе выдается ошибка, так как в функцию переданы неверные входные данные и построить по ним дерево невозможно.

После прохождения алгоритма по всем уровням дерева в массиве вершин предыдущего уровня останется одна единственная вершина – корневая вершина дерева. Функция возвращает ее в качестве результата своей работы.

Блок-схема алгоритма представлена на рисунке 1. Реализация данной блок-схемы в виде программного кода должна быть протестирована соответствующими методами [14,15].

### Варианты решения задачи

Рассмотрим три примера работы программы. В данном случае для наглядного отображения результатов на экран компьютера выводится графическое изображение полученного дерева. В качестве входных данных программа принимает целое число  $K$  – индекс самого верхнего уровня с ненулевым количеством вершин; целое число  $N$  – количество уровней дерева (начиная с  $K$ -го); затем идут  $N$

строк, каждая из которых содержит целое число – количество листовых вершин на уровне. В тексте описания примеров входные данные будут представляться в виде массива целых чисел. Данный массив вводится как показано на рисунке 2.

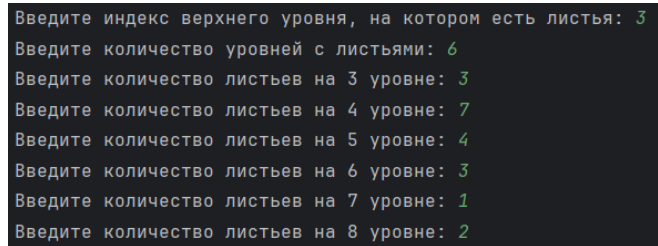


Рис. 2. Ввод массива данных

### Вариант 1 – простое построение дерева

В первом примере на нижнем уровне количество вершин четное – коррекция не требуется.

Входные данные: [2 5 2 2 3 1 2].

Структура дерева описана в таблице 1.

Таблица 1

Структура дерева

Уровень №	Количество листьев
0	0
1	0
2	0
3	3
4	7
5	4
6	3
7	1
8	2

Ввод данных в программу осуществляется посредством созданного интерфейса. Исходя из количества вершин в дереве, которое вводится в первую очередь, на экран последовательно выводятся вопросы о вводе вершин, начиная с самого нижнего уровня и заканчивая самым верхним уровнем, что показано на рисунке 2. В результате реализации алгоритма строится дерево (рис. 3а). Как видно из рисунка, структура дерева совпадает с заданной.

### Вариант 2 – построение дерева с корректировкой

В данном примере на нижнем уровне дерева количество вершин нечетное, соответственно данное количество вершин должно быть скорректировано при реализации алгоритма. Структура исходных, которые должны быть введены в программу представлена в таблице 2. Как видно из таблицы было изменено количество вершин на уровнях два, семь и восемь. В том случае, если данная корректировка не была бы совершена, то невозможно было бы восстановить дерево. Таким образом, стоимость дерева, полученного после корректировки данных, должно отличаться от стоимости оптимального дерева.

Входные данные: [3 7 4 2 3 1].

Результат работы программы исходя из данных примера 2 представлен на рисунке 3.б. Как видно из рисунка, структура дерева была скорректирована.

Таблица 2

Структура дерева

Уровень №	Количество листьев	
	До корректировки	После корректировки
0	0	0
1	0	0
2	0	2
3	3	3
4	7	7
5	4	4
6	2	2
7	3	4
8	1	0

**Вариант 3 – невозможность построения дерева**

В этом примере будет рассмотрена ситуация, когда построение дерева по заданным параметрам невозможно, так как на одном из уровней будет слишком много вершин.

Входные данные: [2 5 2 2 3 1 3].

Структура дерева представлена в таблице 3.

Таблица 3

Структура дерева

Уровень №	Количество вершин	
	Листовых	Всего
0	0	2
1	0	3
2	2	5
3	2	5
4	3	5
5	1	3
6	3	3

Результат работы программы исходя из данных примера 3 представлен на рисунке 3.в. Как видно из рисунка, программы выдала следующую ошибку – «Too many nodes in level 2: 5». Это означает, что после завершения итерации цикла для второго уровня на нем оказалось 5 вершин, в то время как должно было быть не больше, чем  $2^2 = 4$ .

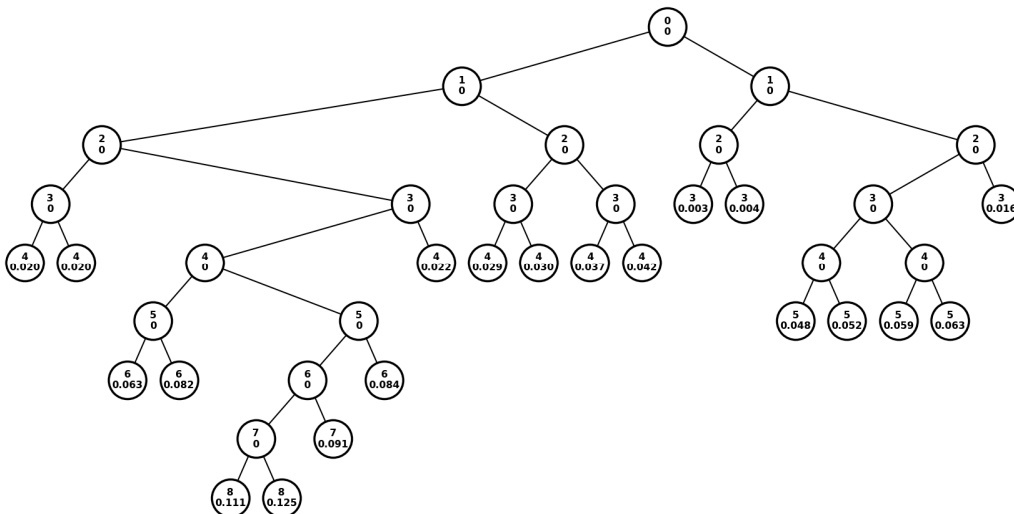


Рис. 3а. Восстановление дерева. Пример 1.

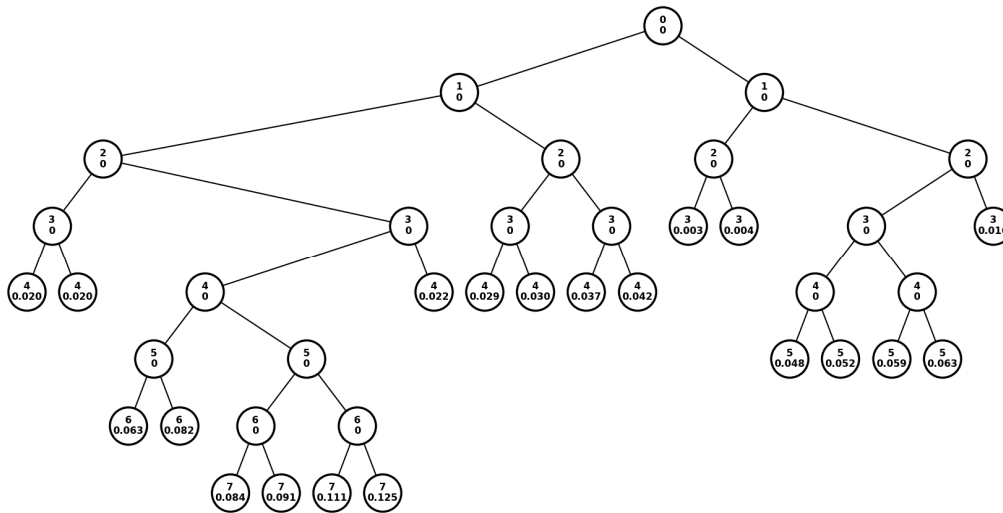


Рис. 3б. Восстановление дерева. Пример 2

```
File "C:\Users\ПК\PycharmProjects\myau-myau\build_tree.py", line 156, in build_tree
    raise ValueError(f"Too many nodes in {level_index} level: {len(cur_level_nodes)}")
ValueError: Too many nodes in 2 level: 5
```

Рис. 3в. Восстановление дерева. Пример 3

### Сравнение с алгоритмом Хаффмана

Построим при помощи алгоритма Хаффмана дерево, в котором 20 листовых вершин (рис. 3). Хаффман использует статистическое кодирование на основе частоты символов, основан на построении префиксных кодов с минимальной избыточностью, где символы с большей частотой получают более короткие коды. Этот метод эффективен для данных с неравномерным распределением символов, таких как текстовые файлы [16]. Основной идеей алгоритма является сжатие данных – процесс преобразования данных, обеспечивающий уменьшение объема данных путем сокращения их избыточности. Целью сжатия данных является обеспечение уменьшения объема занимаемой данными памяти и увеличения скорости обработки [17].

Структура данного дерева представлена в таблице 4. В таблице приведены только уровни с ненулевым количеством листовых вершин.

Таблица 4

Структура дерева, полученного при помощи алгоритма Хаффмана

Уровень	Количество листьев
3	3
4	7
5	4
6	3
7	1
8	2

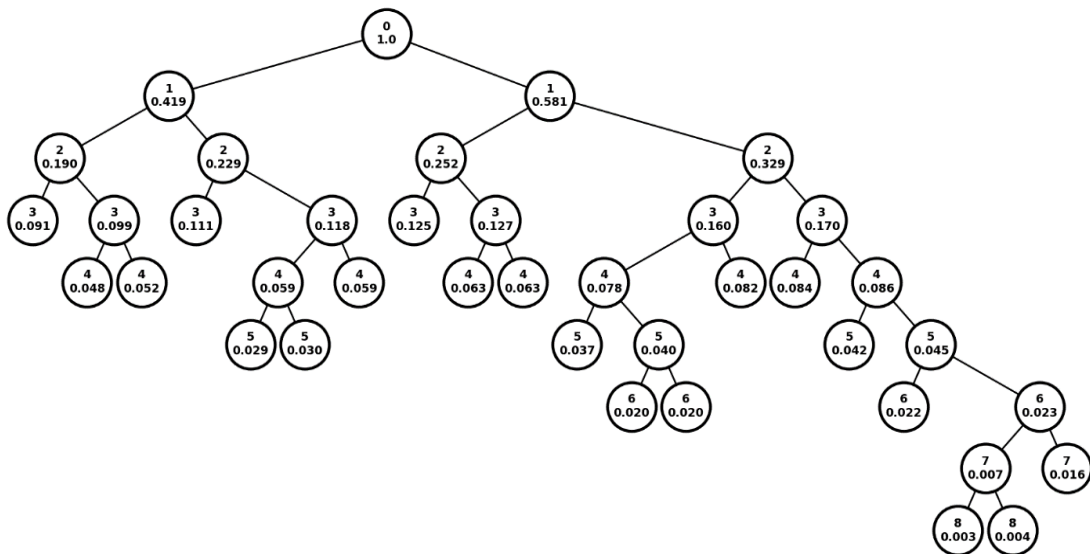


Рис. 4. Дерево построенное через алгоритм Хаффмана

При сравнении деревьев, восстановленного рисунок 3а и построенного с помощью алгоритма Хаффмана, рисунок 4 их структура, а соответственно и стоимость полностью совпадает.

Структурное сходство с деревьями, генерируемыми алгоритмом Хаффмана, достигается за счет построения снизу вверх (от листьев к корню). В обоих случаях базовой операцией является попарное объединение вершин для создания родительского узла. Ключевое различие заключается в критерии выбора пар для объединения: алгоритм Хаффмана выбирает пары с минимальным совокупным весом для оптимизации кода, тогда как наш алгоритм объединяет вершины детерминировано, строго следуя заданному распределению листьев по уровням. Тем не менее, сам механизм сборки дерева – последовательное попарное слияние – обеспечивает генерацию структур, близких к оптимальным по глубине, что и объясняет визуальное и топологическое сходство результатов. Для того чтобы дерево, построенное нашим алгоритмом, совпало с деревом Хаффмана, необходимо и достаточно, чтобы входное распределение листьев по уровням соответствовало распределению, которое получается в результате работы алгоритма Хаффмана для некоторого набора весов.

### Сравнение вычислительной сложности

На каждом уровне дерева добавляются вершины 2 типов:

- листовые, в соответствии с заданным в условии количеством;
- внутренние, для присоединения к дереву вершин с предыдущего уровня.

Добавление определенного количества листовых вершин можно считать операцией с линейным временем выполнения –  $O(n)$ .

Для добавления промежуточных вершин алгоритм попарно проходит по вершинам предыдущего уровня для добавления внутренних вершин. Сложность этой операции линейно зависит от количества внутренних вершин на уровне –  $O(n_{\text{внутр. в.}})$ .

Просуммировав вычислительную сложность для всех уровней, получим, что сложность для целого дерева пропорциональна суммарному количеству внутренних вершин. Так как алгоритм строит полные деревья, будет справедливым замечание, что число внутренних вершин прямо пропорционально числу листовых вершин. Таким образом, вычислительная сложность алгоритма –  $O(n)$ , где  $n$  – число листовых вершин. Это ниже, чем у алгоритма Хаффмана с вычислительной сложностью  $O(n \cdot \log(n))$ .

Таким образом, комбинация процедурного вычисления распределения листьев и предложенного алгоритма составляет альтернативу частому перестроению дерева с помощью алгоритма Хаффмана. Этот подход позволяет значительно быстрее пересчитывать оптимальные пути при изменении топологии сети [18-19].

## Заключение

Был рассмотрен и реализован алгоритм построения бинарного дерева по заданному распределению листьев по уровням. В отличие от классических методов, требующих полного знания структуры или последовательной обработки элементов, предложенный подход позволяет восстановить дерево, опираясь лишь на внешние характеристики – количество листовых вершин на каждом уровне.

Алгоритм способен строить деревья, структурно близкие к тем, которые генерируются алгоритмом Хаффмана, что подтверждает его адекватность для задач, где важно сохранять свойства сбалансированности и оптимальности глубины.

Программа работает за линейное время относительно количества уровней, что делает ее эффективным для использования в задачах с известным или предсказуемым распределением листьев.

Алгоритм может быть использован в областях, где требуется быстрое построение или адаптация дерева без полного пересчета его структуры, например, в сетевых алгоритмах для маршрутизации и топологического моделирования или в системах кодирования и сжатия данных, где распределение листьев может быть предсказано на основе статистики или с использованием средств искусственного интеллекта, машинного обучения и компьютерного зрения [20-29].

## Литература

1. *Gadasin D. V., Shvedov A. V., Yudin A. A.* Clustering methods in large-scale systems // *Synchroinfo Journal*. 2020. Vol. 6, No. 5, pp. 21-24. DOI 10.36724/2664-066x-2020-6-5-21-24. EDN XHNSYV
2. *Gadasin D. V., Shvedov A. V., Koltsova A. V.* Cluster model for edge computing // 2020 International Conference on Engineering Management of Communication and Technology, EMCTECH 2020 : Proceedings, Vienna, 20-22 октября 2020 года. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020. P. 9261538. DOI 10.1109/EMCTECH49634.2020.9261538. EDN FGDLA
3. *Gadasin D. V., Koltsova A. V., Gadasin D. D.* Algorithm for Building a Cluster for Implementing the 'Memory as a Service' Service in the IoT Concept // 2021 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, Conference Proceedings, Moscow, 16-18 марта 2021 года. Moscow, 2021. P. 9416112. DOI 10.1109/IEEECONF51389.2021.9416112. EDN VRPCFG
4. *Сейдаметова З. С.* Особенности изучения сбалансированных бинарных деревьев поиска // Информационно-компьютерные технологии в экономике, образовании и социальной сфере. 2019. № 3(25). С. 83-93. EDN SWFNEB
5. *Танишева С. С.* Древовидные структуры данных: бинарные деревья, бинарные деревья поиска и кучи // Информационно-компьютерные технологии в экономике, образовании и социальной сфере. 2024. № 4(46). С. 130-136. EDN TKBVOO
6. *Shvedov A. V., Gadasin D. V., Pak E. V.* Application of the Backman Model for the Distribution of Traffic Flows in Networks with Segment Routing // 2022 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, SOSG 2022 – Conference Proceedings, Moscow, 15-17 марта 2022 года. Moscow, 2022. DOI 10.1109/IEEECONF53456.2022.9744344. EDN RBMTBQ
7. *Гадасин Д. В., Смальков Н. А., Кузин И. А.* Использование метода роя частиц для балансировки нагрузки в сетях Интернета вещей // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2022. Т. 13, № 2. С. 17-23. EDN LIUWNT
8. *Гадасин Д. В., Шведов А. В.* Применение транспортной задачи для балансировки нагрузки в условиях нечеткости исходных данных // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2024. Т. 18, № 1. С. 13-20. DOI 10.36724/2072-8735-2024-18-1-13-20. EDN WKNPIX
9. *Гадасин Д. В.* Построение бинарного дерева минимальной цены // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2024. Т. 18, № 11. С. 38-44. DOI 10.36724/2072-8735-2024-18-11-38-44. EDN GMCEWG
10. *Гадасин Д. В., Шведов А. В., Мелькова Е. К.* Структурирование данных исходя из центра масс // Актуальные проблемы и перспективы развития экономики : Труды XXI Международной научно-практической конференции, Симферополь-Гурзуф, 20-22 октября 2022 года. Симферополь: Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, 2022. С. 266-268. EDN RFCCST
11. *Гадасин Д. В., Пак Е. В., Коровушкина В. М., Мелькова Е. К.* Предобработка текстовой информации на основе термов естественного языка // REDS: Телекоммуникационные устройства и системы. 2022. Т. 12, № 1. С. 4-11. EDN PDGAVP
12. *Золотарева П. Ю., Гадасин Д. В., Маклачков К. А.* Методы обработки информации в распределенных информационных системах // Тенденции развития Интернет и цифровой экономики : Труды VI Международной научно-практической конференции, Симферополь-Алушта, 01-03 июня 2023 года. Симферополь: ИП Зуева, 2023. С. 187-189. EDN LGONZK

13. *Gadasin D. V., Shvedov A. V., Vakurin I. S.* Determination of Semantic Proximity of Natural Language Terms for Subsequent Neural Network Training // 2022 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, SOSG 2022 – Conference Proceedings, Moscow, 15-17 марта 2022 года. Moscow, 2022. DOI 10.1109/IEEECONF53456.2022.9744290. EDN LASMDY
14. *Zolotukhin P. A., Melkova E. K., Gadasin D. V., Korovushkina V. M.* Using Intelligent Testing as a Tool to Improve the Quality of Transport Information Systems // 2022 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, SOSG 2022 – Conference Proceedings, Moscow, 15-17 марта 2022 года. Moscow, 2022. DOI 10.1109/IEEECONF53456.2022.9744348. EDN NOMJLX
15. *Шведов А. В., Гадасин Д. В., Коровушкина В. М., Мелькова Е. К.* Интеллектуальное тестирование как способ повышения качества информационной системы // REDS: Телекоммуникационные устройства и системы. 2022. Т. 12, № 2. С. 43-52. EDN GOLZGE
16. *Покочалов М. Н., Гаев Л. В.* Сравнительный анализ алгоритмов сжатия данных без потерь: алгоритм Хаффмана, LZW // Путь к новому пониманию: интеграция междисциплинарных исследований в современную науку и практику: Сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции, Челябинск, 19 мая 2025 года. Стерлитамак: Общество с ограниченной ответственностью "Агентство международных исследований", 2025. С. 35-42. EDN VNRAXC
17. *Виноградова М. С., Ткачева О. С.* Сжатие данных. Алгоритм Хаффмана // Modern European Researches. 2022. Т. 1, № 3. С. 60-69. EDN GBZVGC
18. *Gadasin D. V., Shvedov A. V., Klygina O. G.* Organization of Interaction Between the Concept of Fog Computing and Segment Routing for the Provision of IoT Services in Smart Grid Networks // Wave Electronics and Its Application in Information and Telecommunication Systems. 2022. Vol. 5, No. 1, pp. 141-146. EDN UQSHRH
19. *Гадасин Д. В., Шведов А. В.* Проблемы интеграции концепции "Интернет вещей" и облачных вычислений // Технологии информационного общества : Материалы XIII Международной отраслевой научно-технической конференции, Москва, 20–21 марта 2019 года. Том 2. М.: Издательский дом Медиа Паблицер, 2019. С. 22-23. EDN MEQRFA
20. *Гадасин Д. В., Шведов А. В., Алексеева Е. А.* Информационная энтропия в стохастических сетях связи // Телекоммуникационные и вычислительные системы 2020 : Труды международной научно-технической конференции, Москва, 14-17 декабря 2020 года / Московский технический университет связи и информатики. М.: Горячая линия – Телеком, 2020. С. 108-116. EDN IOGLQH
21. *Gadasin D. V., Shvedov A. V., Kuzin I. A.* Reconstruction of a Three-Dimensional Scene from its Projections in Computer Vision Systems // 2021 Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex, TIRVED 2021 – Conference Proceedings, Moscow, 11-12 ноября 2021 года. Moscow, 2021. DOI 10.1109/TIRVED53476.2021.9639161. EDN CKSNPA
22. *Gadasin D. V., Shvedov A. V., Kuzin I. A.* A model for representing the color and depth metric characteristics of objects in an image // 2021 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications, SYNCHROINFO 2021 – Conference Proceedings, Svetlogorsk, Kaliningrad Region, 30 июня – 02 июля 2021 года. Svetlogorsk, Kaliningrad Region, 2021. P. 9488349. DOI 10.1109/SYNCHROINFO51390.2021.9488349. EDN YAYZVP
23. *Гадасин Д. В., Шведов А. В., Кузин И. А.* Трехмерная реконструкция объекта по одному изображению с использованием глубоких сверточных нейронных сетей // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Т. 16, № 7. С. 29-35. DOI 10.36724/2072-8735-2022-16-7-29-35. EDN YTLCNW
24. *Shvedov A. V., Gadasin D. V., Alyoshintsev A. V.* Segment routing in data transmission networks // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Vol. 16, No. 5, pp. 56-62. DOI 10.36724/2072-8735-2022-16-5-56-62. EDN VAYLJQ
25. *Alyoshintsev A. V., Gadasin D. V., Vakurin D. S., Chelyshkov P. D.* Methods for evaluating the noise immunity of modems // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2025. Vol. 19, No. 9, pp. 50-58. DOI 10.36724/2072-8735-2025-19-9-50-58. EDN TGKCQD
26. *Гадасин Д. В.* Способ определения основных узлов сети для анализа ее состояния // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2025. Т. 19, № 12. С. 16-24. DOI 10.36724/2072-8735-2025-19-12-16-24. EDN FGAATI
27. *Мелькова Е. К., Шведов А. В., Трemasова Л. А., Гадасин Д. В.* Организация кластера исходя из функции принадлежности // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2023. Т. 14, № 1. С. 30-39. EDN CNVIJU
28. *Яковенко Н. В., Гадасин Д. В., Коцич Л.* Повышение точности коэффициента влияния ошибок в информационных системах с применением метода обратного распространения ошибки // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2024. Т. 15, № 4. С. 35-42. EDN CMFVNH
29. *Шульпина П. Д., Гадасин Д. В., Трemasова Л. А.* Взвешивание признаков как предварительная обработка исходных наборов данных // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2024. Т. 15, № 3. С. 40-47. EDN BLOWRB

# СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СЛОТОВОЙ СТРУКТУРЫ URLLC И eMBB С РЕЗЕРВИРОВАНИЕМ ПАКЕТОВ В АРХИТЕКТУРЕ 5G ADVANCED

**Ермакова Анастасия Всеволодовна**

*МТУСИ, м.н.с, ассистент кафедры РОС, Москва, Россия*

[msikisylya@gmail.com](mailto:msikisylya@gmail.com)

**Сенин Илья Александрович**

*МТУСИ, студент, Москва, Россия*

[mrcicker12@gmail.com](mailto:mrcicker12@gmail.com)

**Илюхин Алексей Алексеевич**

*МТУСИ, студент, Москва, Россия*

[zimniysk.88@gmail.com](mailto:zimniysk.88@gmail.com)

**Любчиков Роман Игоревич**

*МТУСИ, студент, Москва, Россия*

[dezert388@gmail.com](mailto:dezert388@gmail.com)

## **Аннотация**

*В работе представлен анализ и совершенствование слотовой структуры для URLLC (Ultra-Reliable Low-Latency Communication) в архитектуре 5G Advanced. Разработана функциональная модель в Simulink с генераторами URLLC и eMBB-трафика (enhanced Mobile Broadband), блоком оценки состояния канала и адаптивным алгоритмом распределения подслотов с дублированием пакетов. Моделирование показало, что предложенный подход обеспечивает минимальную задержку URLLC-пакетов, высокую надёжность передачи и эффективное использование ресурсов для параллельного eMBB-трафика. Результаты подтверждают целесообразность применения адаптивного управления слотами и механизмов дублирования для повышения эффективности передачи критически важных данных в сетях 5G Advanced.*

## **Ключевые слова:**

*5G Advanced, URLLC, eMBB, адаптивная слотовая структура, дублирование пакетов, минимальная задержка, надёжность передачи.*

## **Введение**

Современные системы мобильной связи продолжают стремительно развиваться, отвечая на растущие требования к пропускной способности, надёжности и минимальной задержке передачи данных [1]. В этом контексте особое значение приобретают технологии пятого поколения (5G) и их последующие усовершенствования, объединённые в концепцию 5G Advanced. Одним из направлений развития является поддержка трафика URLLC (Ultra-Reliable Low-Latency Communication), предназначенного для приложений с критически высокой надёжностью и крайне низкой задержкой, таких как автономное управление транспортными средствами, промышленная автоматизация и телемедицина [2-5].

Реализация URLLC в рамках 5G Advanced требует оптимизации распределения временных ресурсов радиointерфейса, так как стандартная слотовая структура не всегда обеспечивает удовлетворительные показатели по задержке и вероятности успешной передачи [6]. В условиях высокой нагрузки и параллельного обслуживания eMBB-трафика (enhanced Mobile Broadband) возникает необходимость внедрения адаптивных алгоритмов управления слотами, позволяющих динамически резервировать подслоты для URLLC и использовать механизмы дублирования пакетов при снижении качества канала.

Целью исследования является анализ механизмов слотовой структуры URLLC в архитектуре 5G Advanced и разработка методов её совершенствования, направленных на повышение надёжности передачи и минимизацию задержки при сохранении эффективного использования ресурсов радиосети. В работе рассматривается моделирование системы в среде Simulink с генерацией URLLC и eMBB трафика, оценкой состояния канала и динамическим распределением подслотов, что позволяет изу-

чить эффективность предложенных алгоритмов и визуально отследить работу адаптивной слотовой структуры.

Результаты исследования позволяют сделать выводы о необходимости внедрения адаптивного управления слотами и дублирования пакетов для URLLC, а также служат основой для дальнейшего совершенствования сетевых протоколов и практической реализации в системах 5G Advanced.

## 1. Архитектура 5G Advanced

5G Advanced является следующим этапом развития технологий мобильной связи пятого поколения, ориентированный на углублённую модернизацию радиодоступа и сетевой архитектуры с учётом возросших требований к качеству обслуживания и разнообразию цифровых сервисов. В рамках данного этапа акцент смещается с достижения номинальных характеристик 5G к их устойчивому обеспечению в условиях высокой плотности пользователей, гетерогенного трафика и жёстких временных ограничений [7, 8]. Существенное внимание уделяется совершенствованию временной организации радиоинтерфейса, механизмов распределения ресурсов и координации между различными типами услуг, что позволяет одновременно поддерживать высокоскоростную передачу данных, массовые подключения устройств и критически важные сервисы с минимальной задержкой и повышенной надёжностью. Архитектура 5G Advanced развивается в сторону большей гибкости и адаптивности, включая расширение функций сетевой сегментации, интеграцию периферийных вычислений и использование интеллектуальных алгоритмов управления, способных учитывать текущее состояние сети и прогнозируемые нагрузки. Данные изменения формируют технологическую основу для практической реализации сложных прикладных сценариев, таких как автоматизированные производственные системы, автономный транспорт и распределённые системы управления, а также создают задел для последующего перехода к сетям следующего поколения [9].

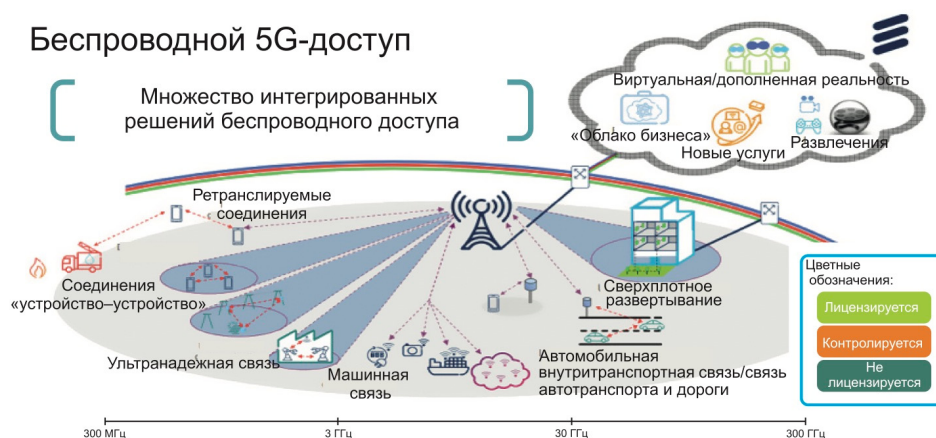


Рис. 1. Архитектура 5G Advanced

Архитектура 5G Advanced формируется как многоуровневая система, в которой развитие функциональных элементов направлено на повышение гибкости, масштабируемости и адаптивности сети к разнородным требованиям сервисов. Основу архитектуры составляет подсистема радиодоступа, представленная усовершенствованным 5G NR, в рамках которого реализуются расширенные механизмы формирования лучей, массивные антенные системы, гибкая временно-частотная структура и динамическое управление радиоресурсами [10-12]. Радиодоступ тесно интегрирован с транспортной сетью, обеспечивающей высокоскоростную и низкозадержанную передачу данных между базовыми станциями и ядром сети, при этом особое внимание уделяется синхронизации и устойчивости соединений. Ядро сети в 5G Advanced развивается в сторону полностью сервисно-ориентированной архитектуры, где сетевые функции реализуются в виде виртуализированных и контейнеризированных модулей, взаимодействующих через стандартизированные интерфейсы, что позволяет гибко масштабировать ресурсы, изолировать различные логические сегменты сети и адаптировать параметры обслуживания под конкретные классы приложений.

Главным элементом архитектуры является уровень периферийных вычислений, размещаемый вблизи точки радиодоступа и предназначенный для обработки данных с минимальной задержкой, что особенно важно для критически чувствительных к времени сервисов. Дополняющим компонентом выступают системы интеллектуального управления и оркестрации, использующие аналитические и обучаемые алгоритмы для оптимизации распределения ресурсов, управления нагрузкой и поддержания требуемых показателей качества обслуживания [13].

Развитие концепции 5G Advanced сопровождается рядом преимуществ, однако одновременно выявляющих и определённые ограничения, обусловленные усложнением технологий и архитектурных решений. К числу преимуществ относится повышение адаптивности радиointерфейса, позволяющее более точно согласовывать параметры передачи с текущими условиями сети и характеристиками обслуживаемого трафика, что создаёт предпосылки для устойчивой поддержки сервисов, чувствительных к задержке и потере пакетов, а также для более эффективного совмещения различных классов услуг в рамках единой инфраструктуры. Дополнительным достоинством является расширение возможностей сетевой архитектуры за счёт гибкого распределения ресурсов, логической изоляции сервисов и переноса части функций обработки данных на периферию сети, что способствует снижению задержек и повышению надёжности функционирования приложений. Внедрение интеллектуальных механизмов управления позволяет улучшить прогнозирование нагрузки и повысить общую эффективность использования сетевых ресурсов.

Наряду с указанными преимуществами, 5G Advanced характеризуется рядом недостатков, связанных прежде всего с ростом технологической сложности. Увеличение числа настраиваемых параметров и алгоритмов управления усложняет процессы проектирования, внедрения и эксплуатации сетей, что требует дополнительных вычислительных ресурсов и более высокой квалификации специалистов. Существенным сдерживающим фактором остаётся и экономическая составляющая, поскольку реализация расширенных функций предполагает модернизацию оборудования и программного обеспечения. На практическом уровне возможны трудности, связанные с неоднородностью реализации стандартов и постепенным характером их внедрения, что ограничивает доступность отдельных возможностей и усложняет оценку реальной эффективности технологий на начальных этапах эксплуатации.

## 2. Практические разработки

В настоящее время исследования и практические разработки, связанные с 5G Advanced и в частности с обеспечением URLLC-функциональности, ведутся в нескольких направлениях, которые отражают как стандартизационные инициативы, так и прикладные инженерные подходы. В глобальной телекоммуникационной отрасли крупнейшие вендоры и операторы активно участвуют в формировании и внедрении аппаратно-программных решений, базирующихся на спецификациях 3GPP Release 18/19, которые и определяют состав технологических новаций 5G Advanced. Среди таких компаний отмечаются крупные поставщики сетевого оборудования и чипсетов, вкладывающие значительные ресурсы в разработку базовых станций нового поколения, платформ периферийных вычислений и интеллектуальных механизмов распределения ресурсов для повышения пропускной способности и эффективности сети в целом [14-16].

Наряду с развитием коммерческих решений, в научной литературе публикуются работы [17-19], посвящённые методам улучшения показателей URLLC в радиодоступе. Одно из направлений заключается в разработке алгоритмов динамической координации структуры временных фреймов и управления ресурсами в режимах TDD, которые минимизируют кросс-интерференцию и задержки, адаптируя конфигурации радиоканала под изменяющиеся условия сети. Данные подходы продемонстрировали значительное снижение задержки и улучшение пропускной способности на уровне экспериментов и симуляций, что важно для приложений URLLC с высокими требованиями к надёжности передачи данных и минимальному времени отклика системы.

Другое направление исследований сосредоточено на применении методов искусственного интеллекта и машинного обучения для оптимизации ресурсного среза (slicing) и интеллектуального распределения радиоресурсов между различными типами трафика, включая критически важный URLLC и широкополосный eMBB.

Такие модели позволяют предсказывать поведенческие паттерны нагрузки и более эффективно реагировать на внезапные пики активности, что особенно актуально в гетерогенных сценариях сетевой эксплуатации.

Дополнительно в научных публикациях [20-30] рассматриваются гибридные методы, сочетающие оптимизационные алгоритмы и глубокое обучение для решения задач совместного обслуживания различных сервисов с противоположными требованиями к задержке и пропускной способности. Эти методы направлены на обеспечение высокого уровня надёжности для URLLC без существенного ухудшения качества обслуживания других классов трафика, что отражает реальную практическую потребность будущих сетей (исследования по интеллектуальному ресурсному срезу).

Отдельные прикладные проекты [23] уже демонстрируют коммерческое внедрение элементов 5G Advanced. Например, в ряде стран стартовали пилотные и коммерческие развёртывания сетей, которые базируются на технологиях, близких к 5G Advanced и позволяют достигать высоких скоростей передачи данных в сочетании с низкой задержкой, а также интегрировать расширенные сервисы (включая непосредственный доступ к спутниковым каналам и платформы edge-вычислений) в общую сетевую инфраструктуру.

### **3. Анализ слотовой структуры и механизмов URLLC в 5G Advanced**

В сетях 5G Advanced слотная структура радиointерфейса и связанные с ней механизмы поддержки URLLC рассматриваются как ключевые инструменты обеспечения сверхмалой задержки и высокой надёжности передачи данных в условиях совместного обслуживания разнородного трафика. В основе временной организации радиодоступа по-прежнему лежит концепция масштабируемой нумерологии, однако в 5G Advanced она дополняется более гибкими вариантами формирования слотов и мини-слотов, позволяющими адаптировать длительность передачи к требованиям конкретного сервиса и текущему состоянию радиоканала. Использование укороченных временных интервалов передачи снижает время ожидания доступа к среде и уменьшает сквозную задержку, что критически важно для приложений URLLC.

Центральным механизмом является возможность асинхронного и внеочередного планирования URLLC-пакетов, при котором ресурсы могут быть выделены внутри уже запланированных временных интервалов, предназначенных для других сервисов, что позволяет обеспечить приоритетную передачу критического трафика без полного пересмотра расписания радиоресурсов, однако одновременно порождает задачу управления взаимным влиянием различных типов услуг. В 5G Advanced данная проблема решается за счёт более точного контроля интерференции, усовершенствованных схем кодирования и механизмов повторной передачи, адаптированных под укороченные слоты.

Так же развитие получили методы повышения надёжности доставки URLLC-данных, включая пространственное и временное дублирование передач, а также координацию между несколькими точками радиодоступа. В сочетании с гибкой слотовой структурой это позволяет снизить вероятность потери пакетов даже в условиях неблагоприятного радиоканала. Увеличение степени гибкости временной структуры приводит к росту сложности алгоритмов планирования и повышенным требованиям к точности синхронизации, что особенно заметно при высокой плотности пользователей и интенсивном трафике.

Слотная структура и механизмы URLLC в 5G Advanced формируют компромисс между минимизацией задержки, обеспечением надёжности и эффективным использованием радиоресурсов, а также дальнейшее совершенствование связано с поиском оптимальных схем динамического управления временными интервалами и приоритетами передачи, позволяющих устойчиво поддерживать критически важные сервисы без существенного ухудшения качества обслуживания других классов трафика.

### **4. Совершенствование слотовой структуры URLLC в 5G Advanced**

Совершенствование слотовой структуры для поддержки сервисов URLLC в архитектуре 5G Advanced необходимо рассматривать как задачу динамической адаптации временных ресурсов радиointерфейса к текущим требованиям трафика и состоянию радиосреды. В качестве базового подхода предлагается метод адаптивной иерархической слотовой организации, основанный на сочетании фиксированных временных интервалов и гибко формируемых подслотов, активируемых исключи-

тельно при возникновении URLLC-нагрузки. В предлагаемом методе стандартная слотная сетка используется как опорная структура для обслуживания фонового и широкополосного трафика, тогда как для критически чувствительных пакетов вводится механизм временного локального уплотнения, позволяющий сокращать интервал ожидания передачи без глобального пересмотра расписания [24, 25].

Главным элементом метода является прогнозно-ориентированное управление слотами, при котором решения о выделении укороченных временных интервалов принимаются на основе анализа краткосрочной динамики трафика и параметров радиоканала. Для этого используется модель оценки вероятности появления URLLC-пакетов в ближайшем временном окне, что позволяет заранее резервировать ограниченный объём временных ресурсов в каждом радиокадре. В случае отсутствия критического трафика данные ресурсы автоматически возвращаются в общий пул и используются для обслуживания других сервисов, что минимизирует потери спектральной эффективности.

Для повышения надёжности передачи в предлагаемом методе предусмотрена временная избыточность на уровне подслотов, реализуемая за счёт распределения дублирующих передач в пределах одного опорного слота. Такое решение позволяет сократить время на повторные передачи и повысить вероятность успешной доставки пакета в условиях ухудшения радиоканала. При этом степень избыточности регулируется динамически в зависимости от требований приложения и текущего уровня помех, что предотвращает излишнюю нагрузку на радиоресурсы.

Так же не менее важным преимуществом разработанного метода является локализация воздействия URLLC-передач на другие классы трафика. В отличие от механизмов жёсткого прерывания, предлагаемая слотная организация ограничивает перераспределение ресурсов рамками одного или нескольких смежных слотов, что снижает вариативность задержек для некритических сервисов и упрощает процесс планирования. Данный подход не требует изменения базовой нумерологии 5G NR и может быть интегрирована в существующие алгоритмы планирования за счёт расширения логики управления временными интервалами. Предложенный метод совершенствования слотовой структуры даёт снижение задержки и повышение надёжности URLLC с сохранением эффективности использования радиоресурсов.

Система адаптивной слотовой структуры URLLC в архитектуре 5G Advanced реализована в виде моделируемой Simulink-схемы, представленной на рисунке 2, включающей несколько взаимосвязанных функциональных блоков, каждый из которых выполняет определённую роль в обеспечении минимальной задержки и высокой надёжности передачи критически важных данных.

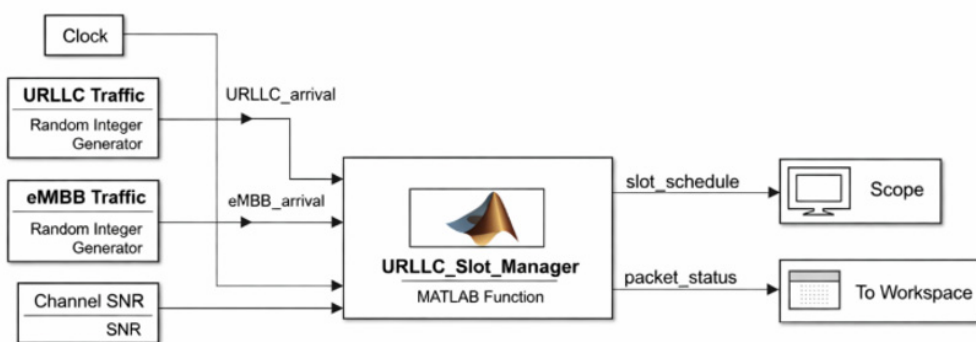


Рис. 2. Разработанная модель слотовой системы URLLC в 5G Advanced

Основным источником синхронизации всей системы выступает блок Clock, который генерирует сигнал текущего времени и обеспечивает согласованность работы всех последующих элементов. При помощи этого блока закладывается фундамент для расчёта временных интервалов передачи и прогнозирования появления URLLC-пакетов, позволяя системе динамически реагировать на изменения трафика и состояния радиоканала.

Генератор URLLC-трафика, выполненный с использованием блока Random Integer Generator, моделирует поступление пакетов с крайне низкой задержкой и высокой критичностью. Каждый временной шаг генератора определяет, появился ли новый пакет URLLC, что формирует двоичный сигнал, поступающий на MATLAB Function блок. Поступивший сигнал является входным параметром для принятия решения о необходимости резервирования подслота и последующего распределения

ресурсов в рамках слота. Параллельно работает генератор eMBB-трафика, также реализованный через Random Integer Generator, который моделирует фоновый высокопроизводительный трафик с менее строгими требованиями к задержке. Сигнал eMBB используется для заполнения оставшихся свободных подслотов, что минимизирует влияние URLLC-передач на качество обслуживания фонового трафика.

Вход Channel SNR (Signal-to-Noise Ration), реализованный через блок Constant, задаёт текущее качество радиоканала и служит основой для расчёта вероятности передачи пакетов URLLC. На основе значения отношения сигнал/шум система определяет необходимость дублирования пакета, применяя временное или пространственное резервирование.

Центральным элементом системы является MATLAB Function блок с названием URLLC\_Slot\_Manager, который реализует всю логику адаптивного управления слотами. Внутри этого блока выполняется несколько ключевых функций. Во-первых, осуществляется прогнозирование появления URLLC-пакетов на основе анализа последних временных интервалов, что позволяет заранее резервировать подслоты даже до фактического поступления пакета, сокращая задержку и повышая вероятность своевременной передачи. Блок URLLC\_Slot\_Manager выполняет динамическое выделение подслотов: при поступлении URLLC-пакета первый свободный подслот активируется для передачи, а при необходимости система резервирует дополнительный подслот для дублирования. Так же блок URLLC\_Slot\_Manager управляет совместным обслуживанием eMBB-пакетов, заполняя свободные подслоты фонового трафика без нарушения приоритетов URLLC и вычисляет успешность передачи пакета на основе текущего состояния канала, формируя сигнал packet\_status, который фиксирует факт доставки или потери данных.

Для визуализации распределения ресурсов используется блок Score, на который поступает сигнал slot\_schedule из MATLAB Function блока. Score отображает занятость каждого подслота в реальном времени, позволяя наблюдать, какие слоты заняты URLLC, какие eMBB и какие остаются свободными. Параллельно блок To Workspace сохраняет сигнал packet\_status в рабочее пространство MATLAB, что даёт возможность последующего анализа статистики системы, включая вероятность успешной доставки, среднюю задержку и коэффициент занятости подслотов.

В ходе симуляции система работает циклически. На каждом временном шаге Clock генерирует сигнал времени, генераторы трафика создают пакеты URLLC и eMBB, MATLAB Function блок принимает решение о распределении слотов с учётом прогноза и текущей загрузки, выполняется дублирование пакетов при необходимости, и результат передаётся на Score и в рабочее пространство, что обеспечивает непрерывное адаптивное управление временными ресурсами радиоинтерфейса, позволяя гарантировать минимальные задержки для критически важных URLLC-пакетов.

В расширенной модели адаптивной слотовой структуры URLLC в архитектуре 5G Advanced визуализация, отображаемая через блок Score, представляет собой сигнал slot\_schedule, показывающий распределение подслотов во времени и их текущее состояние. Каждый подслот кодируется численно: значение 1 соответствует занятости подслота URLLC-пакетом, значение -1 указывает на использование подслота пакетом eMBB, а значение 0 отражает свободный подслот, который в данный момент не используется никаким трафиком. Пример занятости слотов, рассчитанной разработанной моделью, представлен в таблице 1.

Таблица 1

Пример занятости слотов, рассчитанной разработанной моделью

Время, мс	Подслот 1	Подслот 2	Подслот 3
1	0	-1	-1
2	1	0	-1
3	1 (дублир.)	-1	0

Для иллюстрации работы системы проведена симуляция продолжительностью 20 временных слотов, в которой URLLC-трафик генерируется с низкой интенсивностью, а eMBB – с более высокой, отражая условия реальной сети 5G Advanced. Качество канала установлено на уровне SNR = 20 дБ, что обеспечивает высокий процент успешной доставки URLLC-пакетов, но допускает вероятность необходимости дублирования.

На рисунке 3 представлен график модуляции сигналов slot\_schedule для каждого подслота, который на каждом временном шаге отражается состояние подслота: 1 – URLLC, -1 – eMBB, 0 – свободный подслот.

Временной шаг	Подслот 1	Подслот 2	Подслот 3	
1	0	-1	-1	Начало симуляции, нет URLLC, eMBB занимает доступные слоты
2	1	0	-1	Поступил URLLC-пакет, выделен первый подслот, eMBB остаётся в третьем
3	1	0	-1	Дублирование URLLC-пакета во втором подслоте для повышения надёжности
4	0	-1	-1	URLLC-пакет успешно передан, подслоты освобождены, eMBB занимает свободные
5	1	1	0	Одновременно поступили два URLLC-пакета, оба подслота выделены для URLLC
6	0	-1	-1	URLLC доставлены, eMBB снова заполняет подслоты
7	0	0	-1	Нет URLLC, один подслот остаётся свободным
8	1	0	-1	Новый URLLC-пакет поступил, первый подслот выделен
9	1	1	0	Дублирование URLLC во втором подслоте
10	0	-1	-1	URLLC-пакеты доставлены, eMBB занимает подслоты
11	0	0	-1	Нет URLLC, часть подслотов свободна
12	1	0	-1	Поступление нового URLLC-пакета, первый подслот выделен
13	1	1	0	Дублирование URLLC для надёжности
14	0	-1	-1	URLLC успешно доставлен, eMBB занимает свободные подслоты
15	0	0	0	Временный простой, все подслоты свободны
16	1	0	-1	Поступил URLLC, первый подслот занят
17	1	1	0	Дублирование URLLC во втором подслоте
18	0	-1	-1	URLLC доставлен, eMBB снова использует подслоты
19	0	0	-1	URLLC отсутствует, один подслот свободен
20	1	0	-1	Последний URLLC-пакет симуляции занимает первый подслот

**Рис. 3.** График модуляции сигналов slot\_schedule для каждого подслота, который на каждом временном шаге отражается состояние подслота

Из приведённой последовательности распределения занятости подслотов можно сделать вывод, что:

- каждый поступивший URLLC-пакет занимает первый свободный подслот, что подтверждает минимальную задержку передачи;
- при критичности передачи пакеты URLLC резервируются во втором подслоте (например, шаги 3, 5, 9, 13, 17), что повышает надёжность передачи;
- фоновые пакеты eMBB занимают свободные подслоты, но не прерывают URLLC;
- на некоторых временных шагах (например, 7, 11, 15, 19) подслоты остаются свободными, что отражает способность системы адаптироваться к непредсказуемым поступлениям URLLC-пакетов.

Графики распределения подслотов по времени представлены на рисунке 4, где по оси X будет временной шаг, а по оси Y – состояние каждого подслота (1, -1, 0).

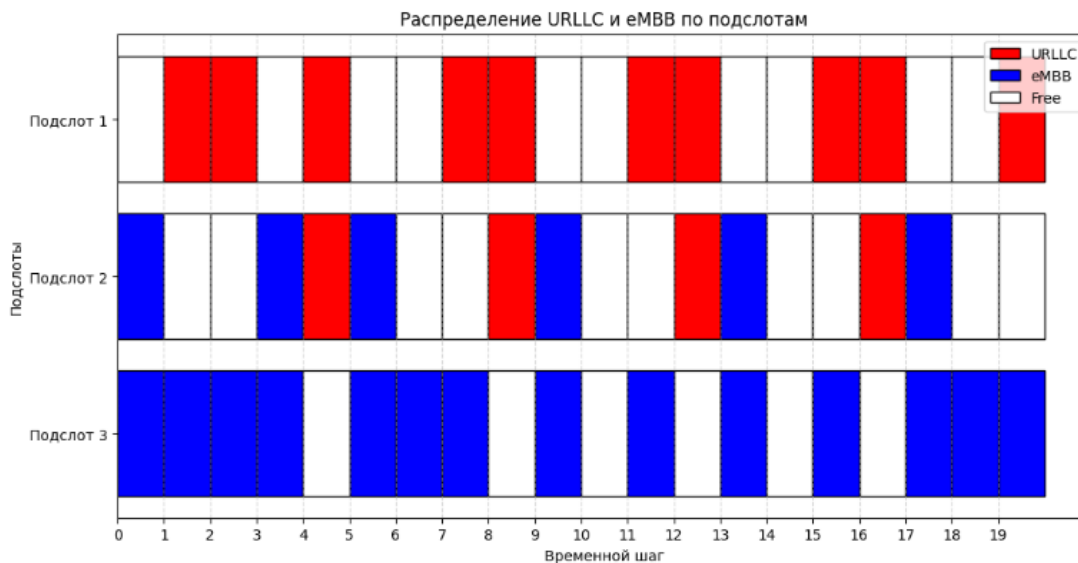


Рис. 4. Графики распределения подслотов по времени

Красные блоки обозначают URLLC-пакеты, которые занимают подслоты с приоритетом, синие блоки отражают eMBB-пакеты, заполняющие свободные подслоты без нарушения приоритета URLLC, а белые блоки демонстрируют свободные подслоты, которые система оставляет для возможного поступления URLLC-пакетов. На рисунке 4 особенно заметны моменты дублирования URLLC-пакетов, выделенные красным цветом на шагах 3, 5, 9, 13 и 17, что повышает надёжность передачи, тогда как белые промежутки показывают резервирование системы и её адаптивность к непредсказуемому трафику.

### Заключение

Анализ результатов моделирования показал, что разработанный алгоритм эффективно распределяет подслоты между URLLC и eMBB, резервирует подслоты для критических пакетов и применяет дублирование при необходимости, что позволяет практически полностью исключить потери URLLC-пакетов. Визуализация распределения подслотов и сохранённые данные по успешной доставке пакетов демонстрируют адаптивность системы к изменяющимся условиям канала и непредсказуемому трафику, обеспечивая оптимальное использование радиоресурсов.

### Литература

1. Ермакова А. В. Текущее состояние сети 5G, перспективы развития и развертывания сети 5G // Студенческий вестник. 2021. № 21-8(166). С. 46-50. EDN CXCKGB
2. Ермакова А. В. Исследование спектрально-эффективных методов модуляции для систем 5G // Сборник Трудов XII Молодежного Научного Форума МТУСИ Телекоммуникации и информационные технологии Реали Возможности Перспективы, Московский технический университет связи и информатики, 12-23 апреля 2021 года. М.: Московский технический университет связи и информатики, 2021. С. 9-17. EDN AVAMZK
3. Ермакова А. В., Макаров П. О. Множественный доступ с разреженным кодом для беспроводных сетей связи 6G // Научный аспект. 2023. Т. 12, № 6. С. 1572-1581. EDN LDNDAM
4. Горгадзе С. Ф., Ермакова А. В. Эффективность технологий IDMA и CDMA при малом коэффициенте расширения спектра // DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. 2023. Т. 13, № 2. С. 22-29. EDN XYLBLY
5. Горгадзе С. Ф., Ермакова А. В. Эффективность вариантов многостанционного доступа для сотовых сетей 5G и 6G // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2022. Т. 14, № 2. С. 19-26. DOI 10.36724/2409-5419-2022-14-2-19-26. EDN JSJBHS
6. Горгадзе С. Ф., Ермакова А. В., Кудряшова А. Ю. Групповые сигналы на основе симметричных ортогональных матриц и обработка многолучевых сигналов // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2025. Т. 19, № 10. С. 21-34. DOI 10.36724/2072-8735-2025-19-10-21-34. EDN AMTGTV

7. Тихвинский В. О., Терентьев С. В., Коваль В. А., Девяткин Е. Е. Развитие сетей мобильной связи от 5G Advanced к 6G: проекты, технологии, архитектура. М.: Рекламно-издательский центр "Техносфера", 2023. 528 с. (Мир связи). ISBN 978-5-94836-662-3. EDN USKQJR
8. Тихвинский В. О., Терентьев С. В., Коваль В. А., Девяткин Е. Е. Развитие сетей мобильной связи от 5G Advanced к 6G: проекты, технологии, архитектура Издание 2-е, дополненное. М.: Рекламно-издательский центр "Техносфера", 2024. 532 с. ISBN 978-5-94836-690-6. EDN KFRBNF
9. Vu S. D., Ermakova A. V., Gorgadze S. F. Fast Spectral Transformations in the Truncated Walsh-Hadamard Basic and Synchronization of M-like Sequences // Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications. 2024. Vol. 7, No. 1, pp. 623-628. DOI 10.1109/SYNCHROINFO61835.2024.10617540. EDN RCVAKI
10. Горгадзе С. Ф., Ву Ш. Д., Ермакова А. В. Синхронизация последовательностей Голда на основе быстрого преобразования в усеченном базисе функций Уолша-Адамара // Радиотехника и электроника. 2024. Т. 69, № 2. С. 137-145. DOI 10.31857/S0033849424020045. EDN KMVICC
11. Горгадзе С. Ф., Ву Ш. Д., Ермакова А. В. Синхронизация м-последовательностей на основе быстрого преобразования Адамара // Радиотехника и электроника. 2024. Т. 69, № 2. С. 122-136. DOI 10.31857/S0033849424020031. EDN KMXKJN
12. Скрынников В. Г. Будущий облик 5G // Электросвязь. 2013. № 10. С. 34-37. EDN RNORKN
13. Ermakova A. V. Improving the Energy Efficiency of 5G and 6G Systems with Linear Recurrent Sequence Synchronization Methods in the Vilenkin-Crestenson Function Basis // 2025 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO), Tyumen, Russian Federation, 2025, pp. 1-9, doi: 10.1109/SYNCHROINFO65403.2025.11079349.
14. Крейнделин В. Б., Усачев В. А. LTE-Advanced Pro как основа для новых сценариев M2M / В. Б. Крейнделин // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2017. Т. 11, № 3. С. 28-32. EDN YKVPGX
15. Верзун Н. А., Колбанев М. О., Омелян А. В. Перспективные технологии инфокоммуникационного взаимодействия. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный экономический университет, 2017. 76 с. ISBN 978-5-7310-3942-0. EDN ZSZGZF
16. Ермакова А. В., Горгадзе С. Ф. Синхронизация многозначных линейных рекуррентных последовательностей на основе обобщенного быстрого преобразования Фурье // Электросвязь. 2025. № 4. С. 74-86. DOI 10.34832/ELSV.2025.66.4.009. EDN JVFZEY
17. Ву Ш. Д., Ермакова А. В., Горгадзе С. Ф. Быстрые спектральные преобразования в усеченном базисе Уолша-Адамара и синхронизация м-подобных последовательностей // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2024. Т. 15, № 5. С. 32-39. EDN PEICUG
18. Кокорева Е. В. Сравнительная характеристика систем мобильной связи четвертого и пятого поколения // Экономика и качество систем связи. 2022. № 3(25). С. 37-45. EDN RGSWTV
19. Горгадзе С. Ф., Ермакова А. В., Кудряшова А. Ю. Многостанционный доступ на основе циркулярных матриц многопозиционных линейных рекуррентных последовательностей // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2025. Т. 19, № 3. С. 37-53. DOI 10.36724/2072-8735-2025-19-3-37-53. EDN BYRCCD
20. Ермакова А. В. Использование неортогональных поднесущих на основе сегментов м-последовательностей для формирования групповых сигналов систем мобильной связи // DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. 2024. Т. 14, № 3. С. 23-29. EDN ADKJXI
21. Kudriashova A. Yu. Secure infrastructure dispatching and automation of engineering systems at healthcare facilities // Т-Comm. 2025. Vol. 19, No. 6, pp. 60-68. DOI 10.36724/2072-8735-2025-19-6-60-68. EDN BGMMUR
22. Кудряшова А. Ю., Богомолова Н. К. Алгоритм поиска радиосигналов ГЛОНАСС в программно-определяемом приемнике с частотным и кодовым разделением // DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. 2024. Т. 14, № 4. С. 54-64. EDN HQJDFD
23. Konstantinov A. S., Pstryakov A. V. Analysis of the Transmission Modes and Downlink Control Information in the LTE-Advanced / 5G Network // 2019 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, SOSG 2019, Moscow, 20-21 марта 2019 года. Moscow, 2019. P. 8706799. DOI 10.1109/SOSG.2019.8706799. EDN WZNEUS
24. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025688526 Российская Федерация. Программа построения кодов с минимальной аперриодичностью : заявл. 07.10.2025 : опубл. 21.10.2025 / А. В. Ермакова, И. С. Кретова, А. Ю. Кудряшова ; заявитель Ордена Трудового Красного Знамени федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский технический университет связи и информатики».
25. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025664152 Российская Федерация. Программа вычисления элементов максимальных мультипликативных групп расширенных полей Галуа : заявл. 19.05.2025 : опубл. 03.06.2025 / А. В. Ермакова, А. С. Соловьев ; заявитель Ордена Трудового Красного Знамени федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский технический университет связи и информатики». EDN AYSSMJ

26. *Поборчая Н. Е., Кудряшова А. Ю.* Анализ нерекуррентных алгоритмов детектирования сигнала 4-qam в системе с ММО с разным количеством антенн в условиях Релеевского канала с доплеровским расширением спектра // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2024. Т. 16, № 5. С. 35-41. DOI 10.36724/2409-5419-2024-16-5-35-41. EDN JWYYLD.

27. *Kudryashova A. Yu.* Development of a program for calculating additional distortions for various models of errors // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Vol. 16, No. 1, pp. 51-58. DOI 10.36724/2072-8735-2022-16-1-51-58. EDN WWZHON.

28. *Kudryashova A. Yu.* Analysis of the peculiarities of encoding messages from various sources // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Vol. 15, No. 9, pp. 56-62. DOI 10.36724/2072-8735-2021-15-9-56-62. EDN SWEFKN.

29. *Leokhin Yu. L., Dymkova S. S., Fatkhulin T. D.* Research and development of image improvement tools // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2025. Vol. 19, No. 4, pp. 45-56. DOI 10.36724/2072-8735-2025-19-4-45-56. EDN FUINEN.

30. *Pastukh A. S., Tikhvinskiy V. O., Dymkova S. S.* Comparative analysis of tri-band payload utilization in satellite access node for future 5G NTN // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2025. Vol. 19, No. 5, pp. 62-75. DOI 10.36724/2072-8735-2025-19-5-62-74. EDN TKMYBV.