

УДК 621.391

# СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ ВИДИМЫМ СВЕТОМ

**А. Н. Соловьев**, научный сотрудник отраслевой лаборатории перспективных инфокоммуникационных технологий

**С. И. Половения**, заведующий кафедрой телекоммуникационных систем, к. т. н., доцент

**А. Ф. Корнеева**, аспирант кафедры телекоммуникационных систем

УО «Белорусская государственная академия связи»

Рассматриваются базовые принципы приема-передачи сигнала системы связи видимым светом с учетом переменного количества источников и приемников излучения. Определение источника света, вида модуляции [1] и оптимального протокола передачи данных позволяет использовать системы связи по видимому свету, таких как Li-Fi, для обеспечения требуемых качества и скорости передачи данных. Все представленные структурные схемы схемотехнически реализованы авторами для проведения исследований и изучения параметров систем связи по видимому свету.

**Ключевые слова:** модулированный сигнал, связь по видимому свету, Li-Fi, оптический канал связи.

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

## ВВЕДЕНИЕ

Системы автоматизации собирают данные от датчиков и исполнительных устройств для мониторинга и управления физическими процессами. Классическая передача данных между модулями системы осуществляется через физические провода, что ограничивает гибкость, масштабируемость и надежность работы системы. Тем не менее, современные тенденции в системах управления техническими процессами предполагают использование беспроводных технологий связи. Переход на беспроводные системы связи позволяет снизить затраты на монтаж и время на ввод в эксплуатацию оборудования, а также повысить надежность связи без использования кабельных разъемов и снизить риски отказов при эксплуатации. Беспроводные системы также позволяют изменять сетевую топологию и модернизировать оборудование в режиме реального времени без остановки производства и длительного простоя. Благодаря возможности установления связи с устройствами системы в любое время и из любой точки, стали доступными преимущества интеллектуальных систем управления. Беспроводной доступ стал основным способом организации связи и превзошел проводной по объему прокачиваемого через него трафика, особенно с распространением мобильности пользователей и продвижением популярных платформ управле-

ния, таких как «Интернет вещей», «Умный дом», «D2D» и «M2M» [2, 3].

## СТРУКТУРНАЯ СХЕМА СИСТЕМЫ СВЯЗИ С ОПТИЧЕСКИМ ДВУХСТОРОННИМ КАНАЛОМ СВЯЗИ

Для создания системы с оптическим двухсторонним каналом связи с возможностью изменений различных параметров питания и обеспечения возможности отследить прохождение информационных сигналов по приемо-передающему тракту оптической линии связи необходимо определить передатчик и приемник.

Оптический передатчик начального уровня представляет собой лазерный диод (ЛД) с излучением в видимом диапазоне света с токовым управлением. Оптический приемник может быть реализован на PIN фотодиоде (ФД) с трансимпедансным усилителем (ТИУ).

На передающей стороне, для стабилизации тока ЛД и реализации амплитудно-импульсной модуляции, можно использовать специализированную микросхему PT4115 [4].

На рис. 1 представлена блок-схема для исследования системы связи по видимому свету (СВС) на PT115. При двунаправленной высокоскоростной передаче такие системы носят название Li-Fi, что означает

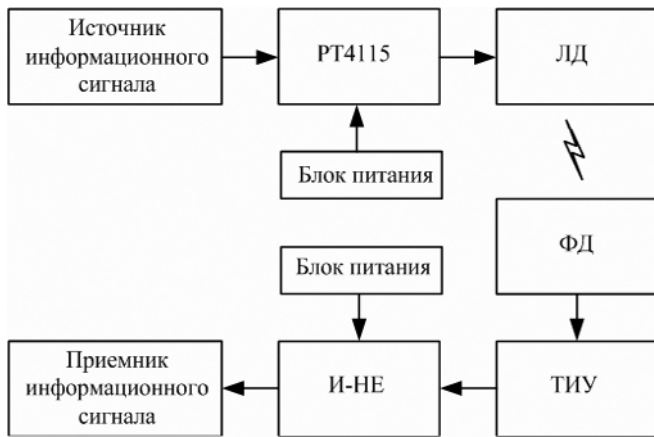


Рисунок 1 – Блок-схема испытательного стенда системы СВС на драйвере PT4115

Light Fidelity, по аналогии с Hi-Fi (High Fidelity) и Wi-Fi (Wireless Fidelity) [5].

На вход драйвера подается сигнал фиксированной амплитуды 2,5 В, что соответствует максимально возможному току нагрузки, различной частоты прямоугольной формы.

Результаты измерений показали, что максимальная частота модулирующего сигнала не превышает 20 кГц – что недостаточно для реализации даже низкоскоростных интерфейсов передачи данных. При

приближении к частоте в 25 кГц напряжение падает ниже 1,7 В и ЛД перестает генерировать излучение, что не позволяет использовать PT4115 для реализации системы СВС, несмотря на все ее достоинства (легкость управления и низкая стоимость).

При такой частоте работы можно обеспечить скорость передачи информации на уровне до 9200 б/с [6], что является недостаточным результатом.

Предыдущий опыт показывает необходимость реализации драйвера ЛД на дискретных элементах для достижения необходимых характеристик системы СВС. Для этого разработана структурная схема двухканальной системы связи (рис. 2).

На рис. 2 показаны стороны А и Б, в каждой из которых реализовано по одному приемному и одному передающему каналу для организации двухсторонней связи. ЛД LD1 получает питание от высокоточного источника с возможностью установки необходимого уровня тока. Для наглядности и контроля источник тока имеет возможность установки максимального тока нагрузки и отображения текущего значения потребляемого тока.

Модуляция сигнала происходит на транзисторе VT1. Для исключения нелинейности модуляции и ограничения максимального тока ЛД в схеме предусмотрены резисторы R1, R2. С их помощью задается

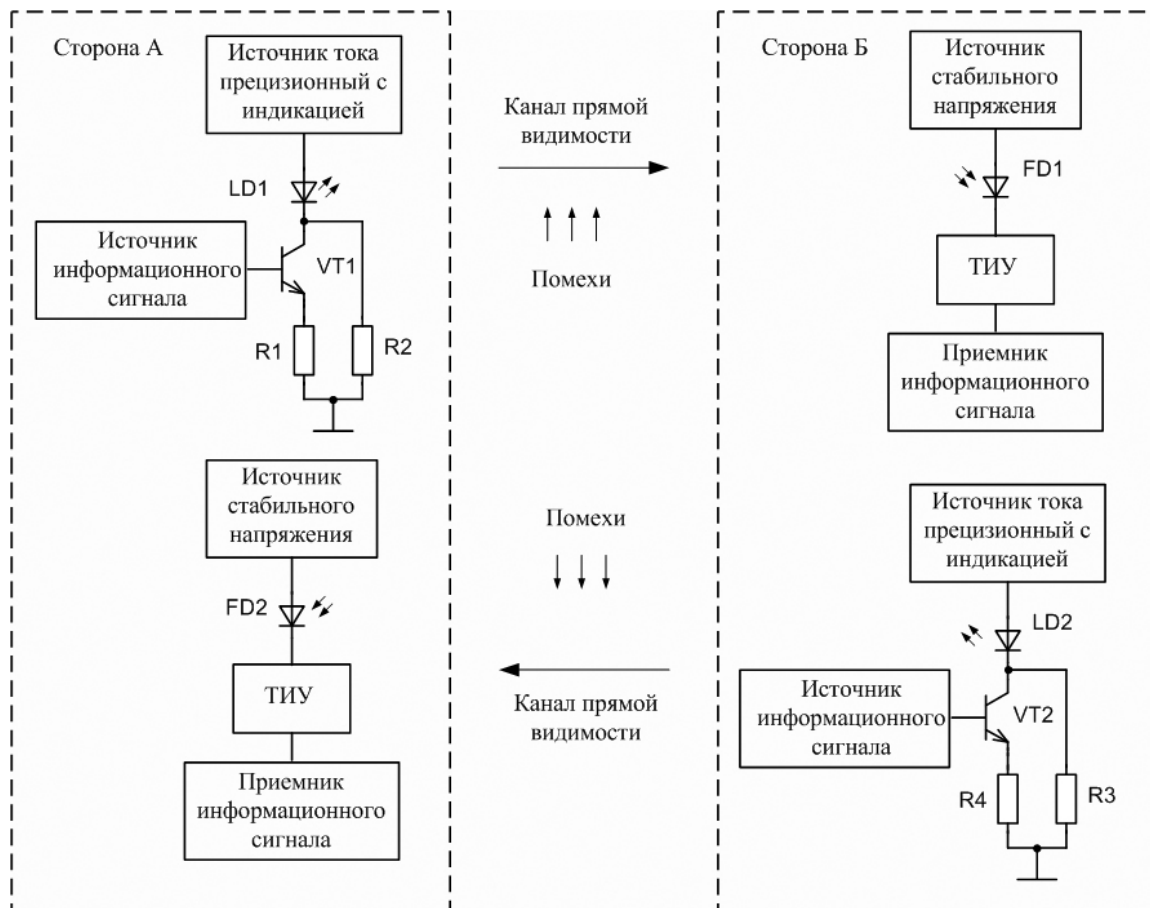


Рисунок 2 – Структурная схема двухканальной системы связи по видимому свету

режим работы в пределах линейных характеристик транзистора и ЛД.

Модулирующим сигналом служит сигнал с генератора сигналов произвольной формы. Генератор позволяет формировать сигнальные информационные последовательности наряду со всевозможными формами гармонических и импульсных сигналов, что позволяет в полной мере исследовать характеристики каналов при работе в различных режимах.

Основным видом модуляции для исследуемой модели принята амплитудная манипуляция. Для тестов на базу модулирующего транзистора, работающего в режиме ключа, подается меандр со скважностью 2.

Модулированный оптический сигнал из ЛД попадает на ФД приемного канала связи.

ФД для преобразования принятого сигнала без искажений должен работать на линейном участке своей вольтамперной характеристики, что реализовано посредством обеспечения необходимого смещения на схеме источником стабильного напряжения.

Полученный в результате воздействия модулированным сигналом на ФД, ток не подходит для дальнейшей обработки. Для его перевода в более удобную форму служит трансимпедансный усилитель. ТИУ преобразует ток фотодиода в пропорциональное напряжение, которое легче поддается обработке.

Напряжение с ТИУ поступает на осциллограф и логический анализатор. Эти приборы позволяют снять входной сигнал и исследовать его характеристики.

Такая схема позволяет проверить работу элементов переднего фронта оптической системы СВС в различных условиях с внесением внешних помех в канал связи.

Максимальная частота модулирующего сигнала зависит от характеристик транзистора и теоретически достигает десятков мегагерц, но в силу индуктивного характера нагрузки ЛД могут наблюдаться значительные искажения по фронтам сигнала, введение снабберных цепей не полностью решает эту проблему. Амплитуда при переходном процессе имеет величину в 2 раза больше, чем исходный сигнал, а колебательный процесс мешает правильному детектированию на приемной стороне.

Данная схема протестирована на частотах до 10 МГц и показала неудовлетворительные результаты.

Недостатки со стороны передающего тракта:

- характеристики модулирующего элемента изменялись со временем из-за изменения температурного режима, что приводит к уходу рабочей точки и изменению выходного сигнала;

- так как ЛД необходимо не только ограничение тока, но и достаточный уровень напряжения для начала генерации (примерно 1,7 В), появилась необходимость в дополнительной стабилизации тока ввиду изменения характеристик модулирующего элемента;

- подаваемый на вход транзистора меандр на выходе превращался в синусоидальный сигнал ввиду нестандартной нагрузки в виде ЛД, что приводит к изменению выходного оптического сигнала.

Недостатки со стороны приемного тракта:

- сложность в подборе необходимого сопротивления для задания коэффициента усиления ОУ ввиду различия характеристик ФД, даже в пределах одной партии;

- необходимость подстройки коэффициента усиления ОУ для каждого ФД;

- на высоких частотах наблюдается переход от прямоугольной формы сигнала к синусоидальной.

В целях минимизации перечисленных недостатков разработана схема приема-передающего тракта, представленная на рис. 3.

В качестве драйвера ЛД можно использовать 6 элементов НЕ, скорпированных в микросхеме 74НС04. Преимущество данного метода заключается в том, что каждый элемент, согласно техническому описанию, способен пропускать ток в 20 мА, соответственно 6 элементов, включенных параллельно, способны обеспечить питание ЛД током около 120 мА. Кроме того, исключается преобразование входного сигнала в синусоидальную форму из-за особенностей микросхемы, на выходе которой может быть только высокий или только низкий уровень сигнала.

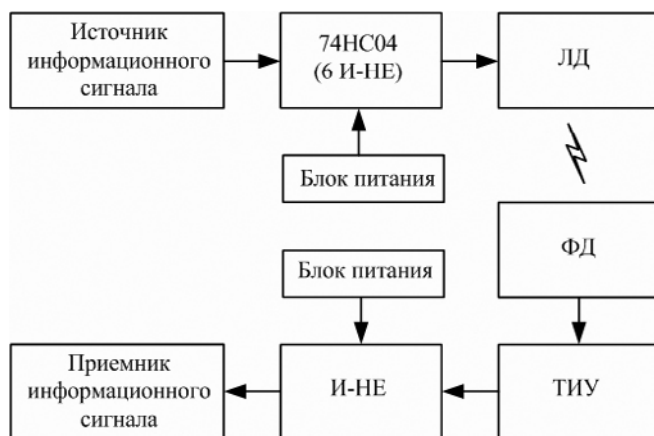


Рисунок 3 – Структурная схема СВС на логических элементах И-НЕ

Основным элементом передающей части служит ЛД типа Д6-7-660-100 с рабочим током 140 мА [7].

Для обеспечения модуляции ЛД, все входы интегральной логической микросхемы 74НС04 включаются параллельно. Стабилизация по току достигается добавлением прецизионного резистора, включенного последовательно с ЛД, а источником тока являются инверторы микросхемы.

В результате такого решения, можно получить частоту модулирующего сигнала на всем диапазоне источника информационного сигнала 15 МГц, фронт

сигнала достаточно ровный, исчезает необходимость в снабберных цепях, обеспечено корректное детектирование на приемной стороне.

На приемной стороне в качестве основного элемента применяется ФД марки ФД-263-01. Максимальная частота детектирования данного ФД составляет 50 МГц. ФД используется в фотопроводящем режиме и служит источником тока для операционного усилителя, работающего по схеме ТИУ.

В первоначальном эксперименте в качестве ОУ для ТИУ выбрана распространенная и общедоступная микросхема LM358. Использование такой микросхемы позволяет детектировать сигнал до 100 кГц, что недостаточно для интерфейсов передачи данных с персонального компьютера (ПК), однако позволяет получить первые результаты по приему сигнала от источника.

После получения неудовлетворительных результатов, в качестве приемного инструментального усилителя применяется более специализированный высокочастотный ОУ AD8055, что позволяет детектировать сигналы до 10 МГц. Для нормализации фронтов выход ОУ подключен к логической микросхеме 74НСТ132, а конкретно к одному элементу И-НЕ, что позволяет получить правильный сигнал, так как исходный был предварительно инвертирован драйвером передатчика.

Структурные схемы систем связи по видимому свету. Для выбора структурной схемы системы СВС необходимо рассмотреть сильные и слабые стороны каждой.

Простейшая линия связи представляет собой соединение с помощью одного исходящего канала и одного входящего.

На рис. 4 показана схема для случая с одним источником и одним приемником, связанных посредством оптической линии связи в видимом диапазоне света.

Схема отличается относительной простотой изготовления, отладки и управления. Потребитель данных представлен в виде ПК. ПК посредством протокола связи с управляющей системой, которая представляет собой микроконтроллер (МК), который получает и отправляет необходимые данные.

Управляющая система МК занимается отправкой и получением данных по физической линии. Для этого служат отдельные тракты приема и передачи оптического сигнала.

Линия передачи данных представляет собой последовательно соединенные блоки аналого-цифрового преобразователя (АЦП), драйвера-модулятора (Др-Мод) и лазерного диода (ЛД). МК отправляет подготовленные для передачи данные на АЦП, которые после преобразования в аналоговый сигнал поступают на модулирующий вход драйвера-модулятора.

Драйвер-модулятор выполняет несколько функций, кроме модуляции лазерного излучения, он так-

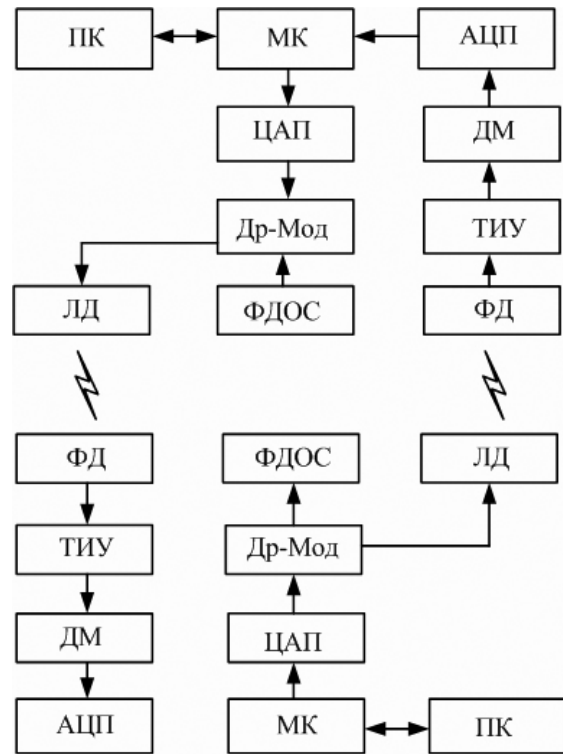


Рисунок 4 – Структурная схема системы СВС с одним источником и одним приемником

же следит за критическими параметрами ЛД (ток, температура) посредством обратной связи от встроенного в ЛД фотодиода обратной связи (ФДОС).

Приемный тракт состоит из приемного ФД, который может быть как PIN-диодом, так и лавинным ФД в зависимости от необходимой чувствительности и внешнего шума.

Ток ФД, который и представляет собой сигнал приемного тракта, для упрощения обработки становится функцией напряжения в ТИУ. Этот блок необходим для дальнейшего прохождения сигнала по схеме.

Сигнал от ТИУ демодулируется в демодуляторе (ДМ) и поступает на цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) для дальнейшей обработки МК и отправки посредством протокола на ПК. Таким образом, формируется полная система, которая позволяет обмениваться данными двум ПК.

К явным недостаткам данной системы можно отнести низкую помехоустойчивость ввиду низкой мощности излучения и малой чувствительности одного ФД. Однако для освоения технологии данная схема подходит как нельзя лучше, т.к. в лабораторных условиях можно отработать основные принципы функционирования системы СВС. Изучить влияние помех и слабые стороны системы.

В такой системе возможна отработка основных видов модуляции систем СВС, таких как амплитудно-импульсная манипуляция (АИМ), широтно-импульсная манипуляция (ШИМ), а также аналоговые модуляции амплитудная, частотная, фазовая и др.

В дальнейших схемах рассматривается только один потребитель, так как второй абсолютно ему симметричен. Также исключаются блоки, которые не оказывают влияния на принцип работы схемы, однако подразумевается их обязательное присутствие (ЦАП, АЦП, модулятор-демодулятор, ФДОС).

Структурная схема формирования полезного сигнала (рис. 6), представляет собой следующую ступень развития.

На рис. 5 представлена версия системы СВС, в которой добавляются возможности преобразования сигнала новыми видами модуляции. Добавив в нее драйвер, управляющий одновременно тремя ЛД и полосовые фильтры на каждый приемный канал с одной стороны усложняется конструкция и падает надежность, однако с другой стороны происходит увеличение скорости передачи за счет распараллеливания поступающих данных.

По сравнению со схемой (рис. 4) в которой одновременно передается один символ, при параллельной передаче сигнала с двумя состояниями (0 и 1) одновременно можно передавать  $2n$  значений, где  $n$  – число каналов. Поднять скорость каналов можно, увеличив число состояний введя дополнительное квантование по амплитуде, однако это усложнит обработку сигнала.

Такая схема будет существенно дороже схемы с одним источником и одним приемником, поэтому ее можно рассматривать для работы в локальной транспортной сети системы СВС. Она содержит драйвер 3 каналов, три ЛД зеленого, красного и синего цвета, 3 ФД и три ТИУ, а также полосовые фильтры (ПФ) для каждого цвета.

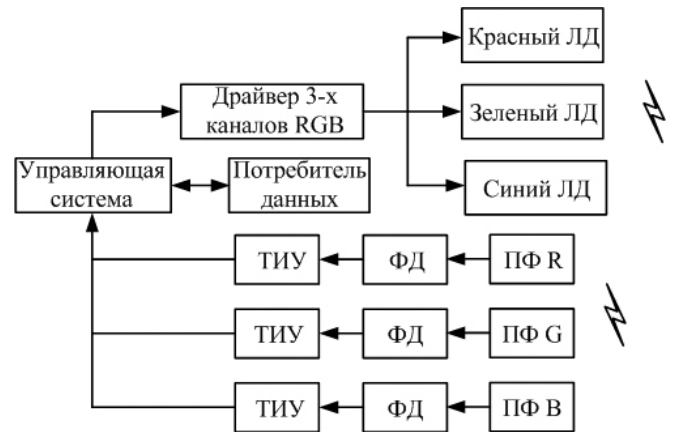


Рисунок 5 – Структурная схема формирования полезного сигнала с тремя источниками и тремя приемниками

Как преимущество этой схемы можно выделить возросшую скорость передачи и возможность расширения числа используемых модуляций с использованием различных цветов.

К возможным недостаткам можно отнести разную способность к распространению в условиях световых помех светового излучения на различных длинах волн.

Схема формирования сигнала в системе СВС с матричными излучателями и приемниками представлена на рис. 6.

Схема передачи строится на принципе параллельной передачи информации по 4 каналам одновременно. Такая схема позволяет за одну посылку передавать 4 бита информации, что соответствует полубиту или нибблу. Таким образом, число отслеживаемых состояний достигает 16. Некоторую сложность

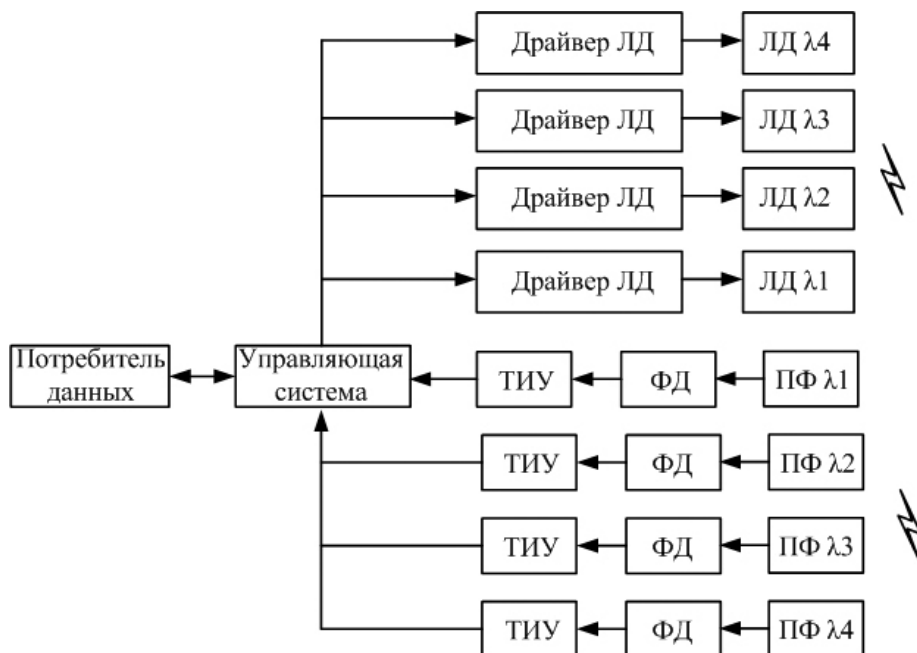


Рисунок 6 – Структурная схема формирования полезного сигнала с матричным каналом связи

представляет собой передача четырех нулей, однако эту проблему можно обойти проработкой протокола связи либо введением сигнала синхронизации.

К недостаткам такой схемы можно отнести сложность реализации ввиду возросшего числа элементов. Кроме того, возникает необходимость наличия оптических фильтров на каждую частоту. Надежность также снижается из-за возросшего числа элементов.

Несмотря на недостатки, данная схема представляется как наиболее перспективная, масштабируя матрицу, возможно, используя недорогие низкоскоростные драйвера ЛД, получить существенное увеличение скорости передачи данных.

После рассмотрения основных схем формирования систем СВС предполагается реализация схем (рис. 4 и 6) для последовательной проработки всех возможных трудностей.

Матричная схема может получить развитие в систему с активной оптической решеткой при добавлении линий задержки, спецкристаллов и высокоскоростных обработчиков сигналов. Такие системы позволяют управлять диаграммой распространения оптического излучения и строить вектора входящих сигналов аналогично фазированным антенным решеткам в радиолокации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработка структурных схем формирователей сигналов Li-Fi представляет собой важный этап в развитии технологий беспроводной связи, основанной на использовании световых волн вместо радиоволн. Li-Fi имеет потенциал превзойти традиционные технологии Wi-Fi и Bluetooth в скорости передачи данных, а также в областях, где электромагнитные помехи являются серьезной проблемой.

В ходе разработки структурных схем формирователей сигналов Li-Fi были рассмотрены различные варианты реализации системы, включая использование LED-ламп, фильтров и оптических устройств.

Результаты исследования показали, что структурные схемы формирователей сигналов Li-Fi могут быть эффективно реализованы с использованием

различных типов оптических устройств и фильтров, которые позволяют управлять световыми сигналами и обеспечивают стабильную передачу данных. Однако следует отметить, что стоимость и сложность реализации данных схемотехнических решений могут быть высокими, что может быть препятствием для их широкого использования.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Половения, С. И. Способы и алгоритмы информационной модуляции сигналов в беспроводных системах цифровой связи / С. И. Половения, В. В. Дубровский, А. Н. Соловьев, А. Ф. Корнеева // Проблемы инфокоммуникаций / Белорусская государственная академия связи. – Минск, 2022. – № 2 (16). – С. 13–23.
2. Tariq, F., Khandaker, M. R. A., Wong, K.-K., Imran, M. A., Bennis, M., Debbah, M. A Speculative Study on 6G // IEEE Wireless Communications. – 2020. – Vol. 27 (4) – P.118–125.
3. Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2017. – 2022. – White Paper, 2019. – P. 33
4. Техническая документация к электронным компонентам на русском языке. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://rudatasheet.ru/datasheets/pt4115/>. – Дата доступа: 11.06.2023.
5. Половения, С. И. Li-Fi – беспроводная коммуникационная технология / Ю. А. Дуйнова, С. И. Половения // Современные средства связи: материалы XXII Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 19–20 октября 2017 г. / УО «Белорусская государственная академия связи». – Минск, 2017. – С. 66–67.
6. Ястребов, И. П. Дискретизация непрерывных сигналов во времени. Теорема Котельникова / И. П. Ястребов. Электронное учебно-методическое пособие. – Нижний Новгород. Нижегородский госуниверситет, 2012. – 31 с.
7. Официальный сайт производителя ESTIGMOS [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.egismos.com/laser-diodes/Red/660nm-laser-diode-D67660100>. – Дата доступа: 15.06.2023.

The basic principles of signal transmission and reception in visible light communication systems are considered, taking into account a variable number of light sources and receivers. Defining the light source, modulation scheme, and optimal data transmission protocol allows for the utilization of visible light communication systems, such as Li-Fi, to achieve the required data transmission quality and speed. All presented structural diagrams are implemented by the authors for research and studying the parameters of visible light communication systems.

**Keywords:** modulated signal, visible light communication, Li-Fi, optical communication channel.