

УДК 621.391.63

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КАНАЛА СВЯЗИ ВИДИМЫМ СВЕТОМ НА БАЗЕ SDR

А.Н. СОЛОВЬЁВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь**Поступила в редакцию 3 апреля 2026*

Аннотация. В работе представлена экспериментальная система для исследования канала связи видимым светом, реализованная на базе программно-определяемых радиосистем и оптоэлектронного тракта. Предложенная установка обеспечивает формирование, передачу и прием сигналов с возможностью управляемого изменения параметров оптического канала и условий распространения. Система ориентирована на регистрацию параметров сигнала, что позволяет исследовать динамические свойства канала, что может быть использовано для исследования временной структуры канала и ее анализа.

Ключевые слова: система связи видимым светом; программно-определяемая радиосистема; OFDM; анализ сигналов; отношение сигнал/шум; временные характеристики; динамика канала.

Введение

Системы связи видимым светом (СВС) являются перспективным направлением развития беспроводных технологий передачи данных. Для организации канала связи используется видимый диапазон света от 380 до 780 нм, что позволяет совмещать применение световых источников для освещения и передачи данных [1]. Увеличение нагрузки на радиочастотный спектр делает системы СВС все более привлекательным дополнением, а в некоторых случаях альтернативой традиционным системам связи [2].

В настоящее время исследования в области систем СВС направлены на повышение надежности передачи данных и на повышение пропускной способности. Основными широко используемыми показателями оценки качества соединения являются такие показатели, как вероятность битовой ошибки (BER), отношение сигнал/шум (SNR) и связанный с ним Q фактор – показатель качества цифрового сигнала [3]. Эти параметры являются базовыми для анализа систем передачи данных и используются для выбора модуляции и алгоритмов обработки сигналов [4].

Несмотря на повсеместное применение данных показателей, их использование в основном ограничивается оценкой канала в определенный фиксированный момент времени или применяется усреднение показателя за выбранный интервал. В реальных условиях канал СВС подвергается воздействию множества факторов, таких как внешняя освещенность, отражения, геометрия распространения сигнала в помещении и специфика оптических и электронных компонентов системы. Все это приводит к формированию динамических процессов и изменению характеристик канала во времени [5].

Для изучения этих явлений требуется исследовательская экспериментальная система, которая может обеспечить формирование сигналов для передачи в системах СВС, управляемое изменение параметров канала и регистрацию динамических характеристик при наблюдении за работой системы. Использование программно определяемой радиосистемы (ПОР) в сочетании с настраиваемым оптоэлектронным трактом прохождения сигнала позволяют построить подобную систему.

В данной работе представлена система, построенная на базе ПОР в сочетании с оптоэлектронным трактом, обеспечивающая передачу и прием оптических сигналов с различными типами модуляции в диапазоне частот 1–10 МГц. Особенностью системы является возможность регистрации параметров сигнала во времени при различных внешних воздействиях, что создает основу для последующего анализа динамически характеристик канала.

Архитектура экспериментальной системы

Архитектура экспериментальной системы исследования канала СВЧ представляет собой тракт передачи и приема сигнала, включающий формирование сигнала, его передачу через оптический канал и последующую регистрацию и обработку на приемной стороне.

Важной особенностью предложенной системы является ее ориентация на непрерывное формирование и регистрацию сигнала и его характеристик во времени. На рис. 1 представлена архитектура экспериментальной установки. Сигнал с настраиваемыми характеристиками передается из формирователя сигнала в программно определяемую радиосистему, после чего поступает в тракт оптоэлектронного передатчика, где преобразуется из электрического в оптический. Далее сигнал распространяется по оптическому каналу и принимается оптоэлектронным приемником. Преобразованный из оптического в электрический сигнал предварительно обрабатывается приемной программно определяемой радиосистемой и передается для обработки, сохранения и анализа в обработчик сигнала.

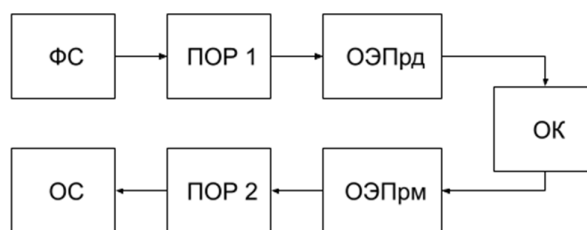


Рис. 1. Архитектура экспериментальной системы исследования канала: ФС – формирователь сигнала; ПОР 1,2 – программно определяемые радиосистемы; ОЭПрд – оптоэлектронный передатчик; ОК – оптический канал; ОЭПрм – оптоэлектронный приемник; ОС – обработчик сигнала

Экспериментальная система может быть реализована в двух основных конфигурациях, отличающихся способом организации формирования и обработки сигналов.

В первой конфигурации используются два вычислительных устройства (формирователя и обработчика сигнала), обеспечивающих раздельную работу передающего и приемного трактов. Такой подход позволяет снизить нагрузку на каждое устройство и повысить стабильность функционирования системы при длительных измерениях.

Во второй конфигурации формирование и прием сигнала могут осуществляются на одном вычислительном устройстве. Данный вариант упрощает структуру, однако предъявляет повышенные требования к вычислительным ресурсам, а также может приводить к дополнительным задержкам обработки.

Независимо от выбранной конфигурации, система ориентирована на обеспечение непрерывного формирования и обработки сигнала. Это позволяет регистрировать характеристики канала и использовать их для анализа его динамических свойств, включая изменение состояния канала под воздействием изменяемых внешних факторов.

Формирование и обработка сигнала

Формирование и прием сигналов в экспериментальной системе производятся посредством ПОР в среде GNU Radio [6], которая представляет собой открытую платформу для разработки и исследования цифровых систем связи. В среде возможно реализовать тракт приема и передачи

электрического сигнала в виде графа, состоящего из различных функциональных блоков, что обеспечивает гибкую настройку параметров сигнала и его анализ в процессе работы системы

В качестве тестовых сигналов для исследования временных характеристик канала могут использоваться как простые, так и сложные виды сигналов. Применение гармонического сигнала позволяет базово оценивать характеристики канала получая отношение сигнал/шум или изучая частотные искажения. Но для оценки канала в полной мере целесообразнее применять широкополосные сигналы используемые для передачи информации.

В качестве такого сигнала предлагается использовать сложный сигнал с ортогональным частотным разделением каналов (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing OFDM), который широко применяется в современных системах CBC [7, 8]. Выбор OFDM также может быть обусловлен тем, что помимо широкого спектра он содержит поднесущие, которые могут по-разному реагировать на изменения в канале связи, что может повысить чувствительность экспериментальной установки и позволит лучше анализировать состояние канала CBC.

Формирование OFDM сигнала реализовано на основе стандартных блоков GNU Radio, которые были настроены под параметры экспериментальной установки. Граф передатчика, который определяет последовательность преобразований сигнала представлен на рис. 2.

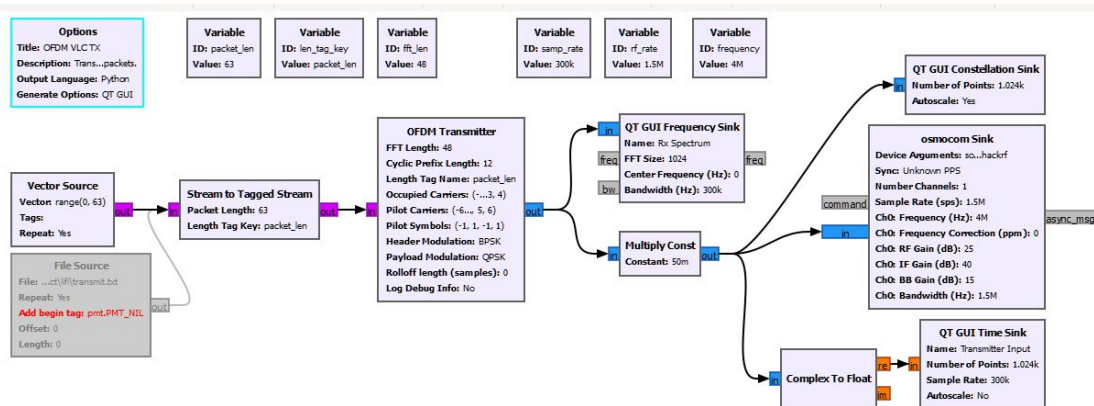


Рис. 2. Граф ФС экспериментальной установки системы CBC

Граф ФС представляет собой передатчик и включает в себя на выбор: один из источников данных в виде файла, либо в виде вектора (пилообразный сигнал), из которых формируется последовательность из символов либо чисел, которая далее преобразуется в поток с метками пакетов определенной длины. Для этого используется блок преобразования потока в пакетную структуру с метками (Stream to Tagged Stream), который обеспечивает корректную сегментацию данных для OFDM-модуляции.

Важнейшим элементом передающего тракта является блок OFDM-модулятора, в котором выполняется формирование поднесущих, добавление пилотных сигналов, а также преобразование сигнала с использованием быстрого преобразования Фурье (Fast Fourier Transform, FFT). С помощью переменных задаются параметры FFT, количество поднесущих и пилотных символов, а также тип модуляции полезной нагрузки и заголовка.

После формирования сигнала выполняется масштабирование его амплитуды для согласования уровней с последующим трактом передачи. Дополнительно в графе предусмотрены средства визуального контроля сигнала, включая отображение спектра осциллограммы выходного сигнала и созвездия, что позволяет контролировать корректность формирования сигнала

Результат запуска графа ФС на исполнение, можно видеть на рис. 3.

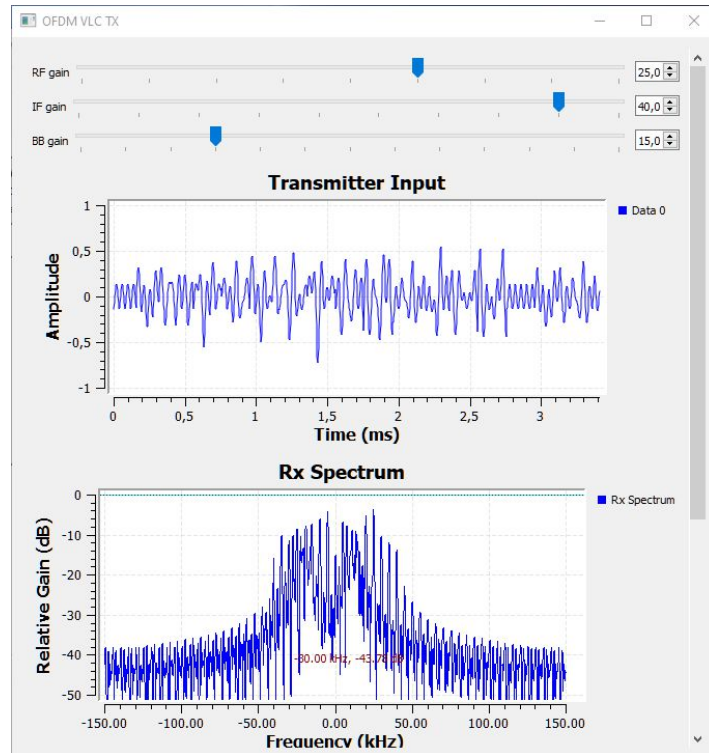


Рис. 3. Выполняемый граф ФС с параметрами усиления и выходным спектром на передачу

Граф ОС, представленный на рис. 4 реализует прием, обработку и визуализацию сигнала.

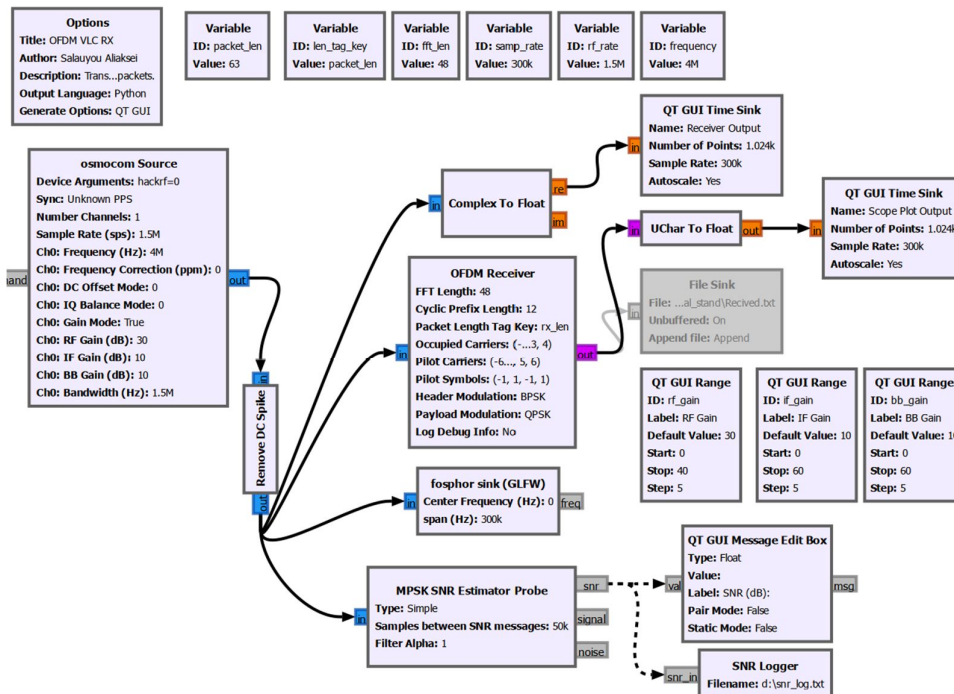


Рис. 4. Граф ОС экспериментальной установки системы СВС

Из сигнала, поступающего с приемного устройства, предварительно удаляется постоянная составляющая, которая негативно влияет на оценку канала. Далее сигнал поступает в блок OFDM-приемника, в котором выполняется синхронизация по пилот сигналам, перенос сигнала в частотную область и демодуляция поднесущих.

После демодуляции выполняется преобразование полученных данных в формат, пригодный для дальнейшей обработки и анализа, а так как основным источником данных в рамках будущей работы для нас является отношение сигнал/шум, остальные блоки вывода временно деактивированы. При необходимости отслеживания коэффициента битовой ошибки (Bit Error Rate – BER) существует возможность записи принятой последовательности в файл для дальнейшей обработки. Также в графе предусмотрены блоки визуализации временной формы сигнала, входных и выходных данных, что позволяет контролировать процесс приема и сопоставлять переданный и принятый сигналы, что особенно удобно в случае передачи векторного сигнала. Также полезен в визуализации и настройке блок «Водопад» (Waterfall), который позволяет не только отслеживать изменения сигналов в реальном времени, но и видеть историю эфира. Результат выполнения графа ОС представлен на рис. 5.

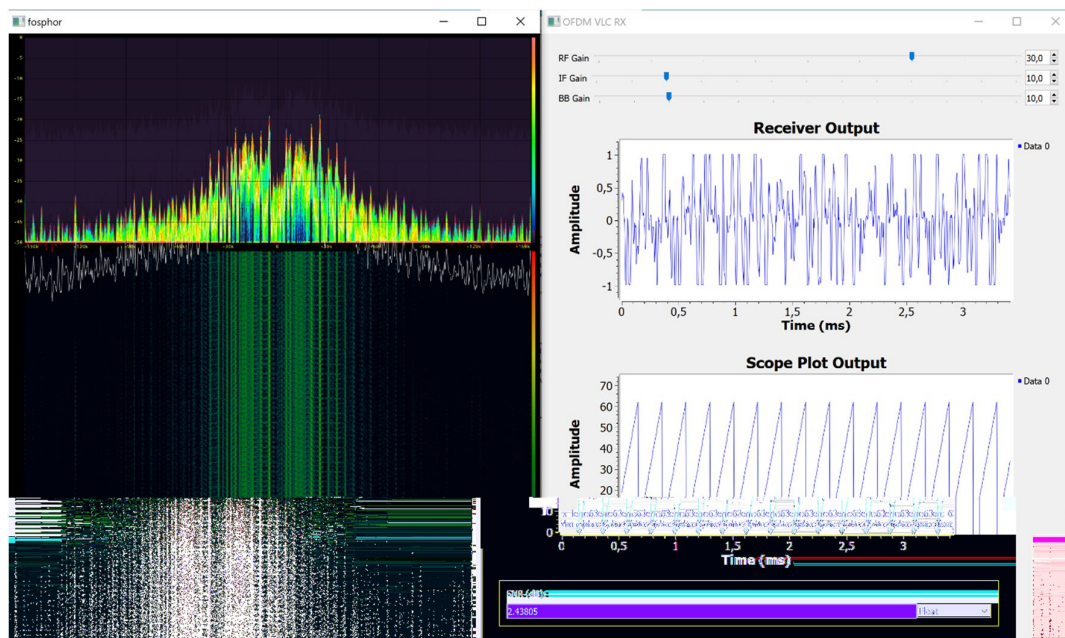


Рис. 5. Выполняемый граф ОС с параметрами усиления принимаемым спектром с памятью и принятым демодулированным сигналом

Важным элементом является блок оценки отношения сигнал/шум, используемый в приемном тракте. Встроенный модуль оценки SNR позволяет получать текущие значения качества сигнала непосредственно в процессе работы системы. Полученные значения через интерфейс пользователя записываются в файл с добавлением временной метки, что обеспечивает формирование временных рядов параметра SNR очень удобных для последующего анализа.

Реализация передающего и приемного трактов в виде графов GNU Radio обеспечивает не только передачу и прием сигнала, но и задействует встроенные средства его анализа. Это позволяет использовать систему как инструмент для исследования характеристик канала, включая их изменение во времени при воздействии различных помех.

Оптоэлектронный тракт

Оптоэлектронный тракт (ОТ) экспериментальной системы служит для преобразования сигнала из электрической формы в оптическую и обратно. В соответствии со структурной схемой на рис. 1 в ОТ можно выделить следующие основные элементы: ПОР 1; ОЭПрд; ОК; ОЭПрм; ПОР 2.

ПОР 1 и ПОР 2 представляют собой программно-определяемые радиосистемы, выполняющие функции цифро-аналогового и аналого-цифрового преобразования, а также первичной обработки сигналов. В базовой конфигурации такие системы обеспечивают формирование и прием сигналов с заданными параметрами и их передачу между цифровой и аналоговой частями тракта.

В общем случае программно-определяемые радиосистемы реализуют настраиваемую архитектуру, в которой функции обработки сигнала распределяются между аппаратной и программной частями. В некоторых устройствах для ускорения обработки используются программируемые пользователем вентильные матрицы (ППВМ, FPGA) и тогда значительная часть алгоритмов преобразования сигнала выполняется на стороне ПОР, а не вычислительной системы.

В рассматриваемой реализации в качестве ПОР используются два устройства HackRF One, которые обеспечивают формирование и прием сигналов в широком диапазоне частот [9]. Применение подобных устройств позволяет оперативно изменять параметры сигнала и проводить эксперименты без модификации аппаратной части. В качестве альтернативных решений могут рассматриваться более производительные платформы, такие как LimeSDR [10], а также другие аналогичные устройства, отличающиеся расширенной полосой пропускания и улучшенными характеристиками аналого-цифровых преобразователей. Экспериментальная установка рассчитана на такие изменения.

Использование ПОР в задачах оптической беспроводной связи давно вызывает интерес у научного сообщества и рассматривается, например, в работах [11, 12], где показана возможность построения и анализа гибких систем передачи данных на базе программно-определяемых радиосистем.

К основным преимуществам применения ПОР в составе оптоэлектронного тракта относятся:

- гибкость настройки параметров сигнала;
- возможность реализации различных методов модуляции;
- интеграция с программными средствами анализа;
- возможность регистрации параметров сигнала во времени.

К недостаткам можно отнести:

- ограниченную точность и динамический диапазон по сравнению со специализированными решениями;
- наличие дополнительных задержек, связанных с буферизацией и обработкой;
- зависимость характеристик от вычислительных ресурсов системы.

ОЭПрд обеспечивает преобразование электрического сигнала, поступающего с ПОР 1, в оптическое излучение. Управление лазерным диодом (в частном случае LPC-815 650 нм) осуществляется посредством модуляции напряжением входного сигнала источника тока. Такой способ соответствует принципу прямой модуляции интенсивности (IM/DD), широко применяемому в системах оптической связи [7]. Использование лазерного диода обеспечивает высокую направленность излучения и достаточную мощность сигнала для проведения экспериментов.

ОК представляет собой среду распространения сигнала, параметры которой могут изменяться в процессе эксперимента. В отличие от волоконно-оптических систем, в данном случае используется свободное пространство, что приводит к дополнительным потерям и влиянию внешних воздействий.

ОЭПрм реализует обратное преобразование сигнала. Фотодиод преобразует оптическое излучение в электрический ток, который затем усиливается трансимпедансным усилителем и преобразуется из токового сигнала в пропорциональное напряжение. Основные свойства кремниевых р-і-п фотодиодов с большой площадью перехода, влияющие на пропускную способность описаны в исследованиях [13]. В экспериментальной установке прием сигнала осуществляется фотодиодом типа ФД263 [14], обладающим достаточной чувствительностью в видимом диапазоне и пригодным для построения быстродействующих фотоприемных устройств.

ОЭПрд и ОЭПрм реализованы на одной печатной плате, представляющей собой модифицированный вариант ранее разработанного Li-Fi модема [15]. В рамках данной экспериментальной установки из схемы были исключены отдельные узлы обработки, что позволило получить доступ к сигналу фотоприемника без предварительной фильтрации и коррекции. В предлагаемой системе обеспечивается возможность регистрации исходного сигнала с фотодиода, содержащего все искажения, шумы и временные изменения, возникающие в канале и элементах.

Внешний вид оптоэлектронной части установки представлен на рис. 6.

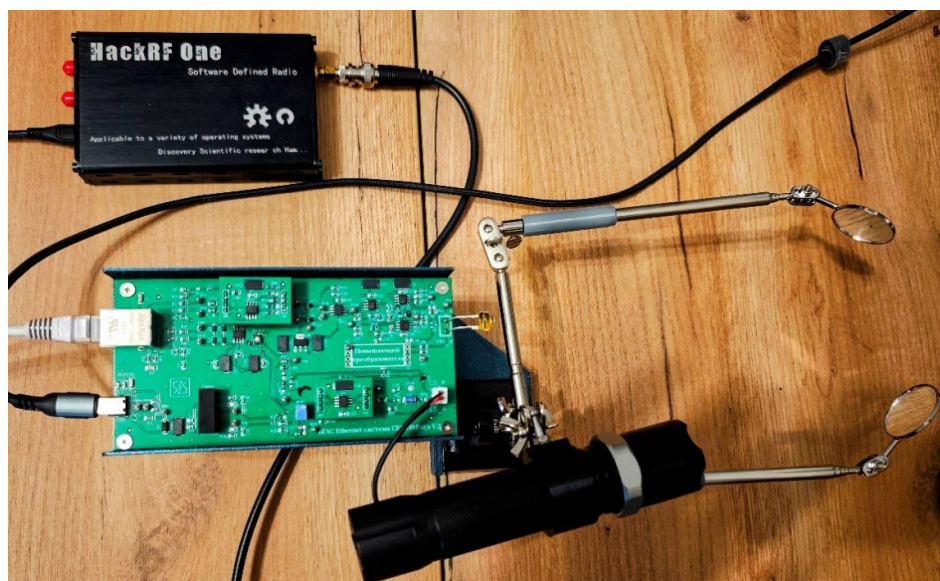


Рис. 6. Оптоэлектронная часть экспериментальной установки

Следует отметить, что используемые оптоэлектронные компоненты не являются жестко фиксированными элементами системы и могут быть заменены в зависимости от условий эксперимента. Это позволяет адаптировать установку под различные диапазоны мощностей, расстояний и условий распространения сигнала.

Таким образом, ПОР, совместно с ОТ, формируют единый преобразующий контур, в котором физические искажения и шумы непосредственно отражаются на характеристиках сигнала, доступных для последующего анализа.

Оптический канал

ОК экспериментальной системы представляет собой управляемую среду распространения оптического излучения между оптоэлектронным передатчиком и приемником формируя замкнутую петлю. В отличие от волоконно-оптических линий связи, такой канал подвержен значительному влиянию внешних факторов, что делает его удобным объектом для экспериментальных исследований с возможностью вносить помехи различного характера.

Конструктивно канал включает фокусирующую линзу и систему из двух отражающих элементов (зеркал), положение которых может изменяться в очень широком диапазоне. Такая конфигурация позволяет варьировать длину оптического пути, угол падения и отражения излучения, а также формировать различные режимы распространения сигнала.

Изменение геометрии канала приводит к изменению условий распространения сигнала, включая потери мощности, расхожимость пучка и влияние отраженных компонент. В ряде работ показано, что для систем связи видимым светом характерно существенное влияние многолучевого распространения и отражений от поверхностей, что приводит к искажению сигнала [5].

На рис. 7 показан один из возможных путей прохождения сигнала, траектория которого проявляется в мелкодисперсионных частицах внесенных в канал.

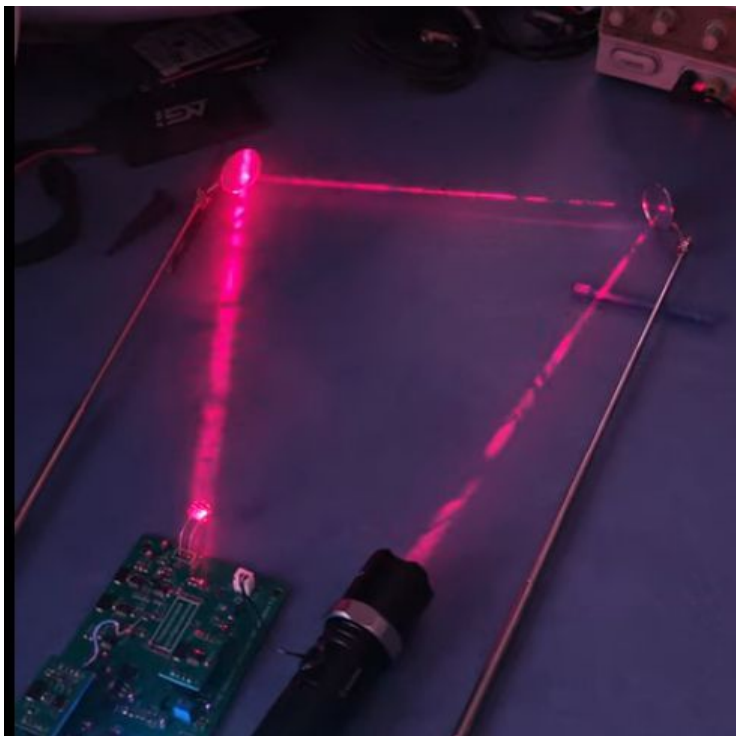


Рис. 7. Конфигурация прохождения света в мелкодисперсионной взвеси

При определенных конфигурациях оптической системы возможно формирование интерференционной картины вследствие наложения расфокусированного луча отраженного одновременно от двух зеркал. Это приводит к пространственно-временным изменениям интенсивности сигнала на приемнике, что также влияет на параметры принимаемого сигнала.

Особенностью рассматриваемой установки является возможность управляемого изменения параметров или внесения помех в канал в процессе эксперимента. Перемещение зеркал и изменение углов отражения позволяют моделировать различные сценарии распространения сигнала, включая увеличение длины канала, появление дополнительных отражений и изменение условий освещенности.

Следует отметить, что в отличие от статических моделей канала, используемых в ряде теоретических работ, реальный оптический канал в помещении является нестационарным. Его параметры изменяются во времени под воздействием внешних факторов, таких как изменение освещенности, движение объектов и нестабильность положения элементов системы.

Оптический канал в предлагаемой системе является не только средой передачи сигнала, но и активным элементом, формирующим его характеристики. Управляемая геометрия канала позволяет получать различные режимы распространения сигнала и исследовать влияние этих условий на его параметры во времени, что является ключевым для анализа его динамических свойств.

Особенности и ограничения системы

Экспериментальная система, реализующая передачу сигнала в канале СВЧ с использованием ПОР и ОТ, обладает рядом особенностей, которые оказывают влияние на характеристики принимаемого сигнала.

К числу таких особенностей относится ограниченная полоса пропускания оптоэлектронных компонентов, включая лазерный диод, фотодиод и усилительные каскады. Данные ограничения приводят к частотным искажениям сигнала и неравномерности амплитудно-частотной характеристики тракта.

Дополнительным фактором является нелинейность элементов передающего тракта, в первую очередь источника тока и лазерного диода. Нелинейные искажения приводят к изменению спектра сигнала и появлению дополнительных гармонических составляющих, что характерно для систем с прямой модуляцией излучения.

На приемной стороне существенное влияние оказывают шумы фотоприемника и усилительных каскадов, включая тепловой и дробовой шум.

Особенностью используемых ПОР является наличие задержек, связанных с буферизацией и обработкой данных, а также использование оконных методов при оценке параметров сигнала. В частности, оценка отношения сигнал/шум осуществляется на основе усреднения по выборке, что приводит к сглаживанию быстрых изменений сигнала во времени.

Следует также отметить нестационарный характер оптического канала. Изменение геометрии распространения сигнала, внешней освещенности и положения элементов установки приводит к изменению параметров канала во времени.

Перечисленные особенности не только ограничивают точность передачи данных, но и формируют наблюдаемую структуру сигнала на выходе системы. В отличие от специализированных систем связи, где подобные эффекты стремятся минимизировать, в рамках данной работы они рассматриваются как источник информации о свойствах канала.

Таким образом, ограничения экспериментальной системы одновременно являются факторами, формирующими динамику сигнала, что позволяет использовать их для исследования временных характеристик канала связи видимым светом.

Обсуждение и заключение

В работе представлена экспериментальная система для исследования канала СВС, реализованная на базе ПОР и ОТ и ОК. Установка обеспечивает формирование, передачу и прием сигнала с возможностью гибкой настройки параметров и управляемого изменения условий распространения.

В отличие от традиционных подходов, основанных на анализе усредненных характеристик, таких как SNR и BER, предложенный подход ориентирован на изучение поведения сигнала во времени. Это позволяет рассматривать канал связи как динамическую среду, параметры которой изменяются под воздействием внешних факторов и конфигурации тракта.

Применение ПОР обеспечивает гибкость формирования сигналов и их последующего анализа без изменения аппаратной части. При этом изменение параметров передачи, включая, но не ограничиваясь типом и параметрами модуляции, может рассматриваться как дополнительный фактор, влияющий на наблюдаемые характеристики сигнала во времени.

ОТ и ОК формируют множество искажений и шумов, определяющих наблюдаемые характеристики сигнала. Возможность изменения геометрии распространения, включая длину пути и условия отражения, позволяет исследовать влияние параметров среды на поведение сигнала.

В результате формируются временные зависимости характеристик сигнала, которые могут быть использованы для анализа устойчивости канала и выявления закономерностей его изменения при различных условиях передачи.

Разработанная установка может рассматриваться как экспериментальная платформа для исследования динамических свойств канала связи видимым светом. Полученные результаты создают основу для дальнейшего перехода к количественным методам анализа временных зависимостей характеристик сигнала.

EXPERIMENTAL SYSTEM FOR VISIBLE LIGHT COMMUNICATION CHANNEL ANALYSIS BASED ON SDR

A.M. SALAUYOU

Abstract. This paper presents an experimental system for the investigation of a visible light communication (VLC) channel, implemented using software-defined radio (SDR) platforms and an optoelectronic transceiver. The proposed setup provides signal generation, transmission, and reception with the ability to control optical channel parameters and propagation conditions. The system is designed for continuous acquisition of signal parameters, enabling the analysis of channel dynamics. This approach can be used to study the temporal structure of the channel and perform its further analysis.)

Keywords: visible light communication system; software-defined radio; OFDM; signal analysis; signal-to-noise ratio; temporal characteristics; channel dynamics.

Список литературы

1. Komine T., Nakagawa M. // IEEE Transactions on Consumer Electronics. 2004. Vol. 50. P. 100–107.
2. Abdul Wadud, Anas Basalamah // ICT Express. 2025. Vol. 11. P. 45–59.
3. Коган С. С. // Первая миля. 2023. № 7. С. 56–61.
4. López-Benítez M. // Physical Communication. 2018. Vol. 30. P. 154–166.
5. Chvojka P. et al. // IEEE Photonics Journal. 2015. Vol. 7. P. 1–10.
6. GNU Radio.
7. Armstrong J. // Journal of Lightwave Technology. 2009. Vol. 27. P. 189–204.
8. Abdullah M. J. et al. // Proc. of 2023 IEEE 98th Vehicular Technology Conference (VTC2023-Fall). 2023. P. 1–2.
9. HackRF One: open source software defined radio platform. 2014.
10. LimeSDR: open source software defined radio platform. 2016.
11. Che M. // Telecom. 2025. Vol. 6. P. 31.
12. Costanzo A., Loscri V., Biagi M. // Journal of Lightwave Technology. 2021. Vol. PP. P. 1–1.
13. Kassem A., Darwazeh I. // Proc. of 2022 13th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP). 2022. P. 467–472.
14. Фотодиод ФД-263: характеристики, применение // Электронные компоненты и радиодетали. 2026.
15. Соловьев А. Н., Половения С. И. // Веснік сувязі. 2025. № 4. С. 58–64.