

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.11.2>

УДК: 621.371

**ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ SDR
ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОСТИ:
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КАНАЛА
С OFDM МОДУЛЯЦИЕЙ В GNU RADIO**

С.Ю. Ганигин, А.С. Нечаев, В.В. Киященко, М.М. Голубева, Е.С. Журавлева

Самарский государственный технический университет,
443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244, главный корпус

Статья поступила в редакцию 1 августа 2023 г.

Аннотация. Данная статья представляет исследование OFDM – особый метод передачи с использованием нескольких несущих частот, который обеспечивает более высокие скорости передачи данных путем плотной упаковки несущих частот. В статье представлены основные термины, подробное описание применений, технологий и модуляций, используемых OFDM. Была выполнена реализация системы связи OFDM с имитацией радиоканала, а также системы передачи пакетов по реальному радиоканалу с применением технологии SDR. Авторы делают выводы о преимуществах и недостатках данного подхода, а также предлагают возможные варианты решения проблем. Выбор этого направления исследования обусловлен преимуществами, которыми обладают OFDM и SDR, особенно с учетом пропускной способности канала и стоимости. Разработка прототипа была осуществлена с использованием программного обеспечения с открытым исходным кодом GNU Radio.

Ключевые слова: OFDM, SDR, мультиплексирование, частотное разделение, помехозащищенность, пропускная способность канала.

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания (тема № АААА-А12-2110800012-0).

Автор для переписки: Журавлева Елена Сергеевна, es_job@list.ru

Введение

С каждым годом наблюдается появление новых поколений сетей, возрастает потребность в передаче трафика, а использование больших объемов данных становится всеобщим явлением, охватывая области от образования до интеллектуального производства, от видеоигр до автономного транспорта. Высокая скорость передачи данных, надежность и минимальные задержки становятся неотъемлемыми требованиями для эффективного функционирования во всех сферах нашей жизни. В связи с этим, беспроводная связь и разработка новых методов передачи сигнала являются постоянными объектами исследований. С другой стороны, программно-определяемое радио (SDR) представляет собой подход, который обеспечивает гибкость исследований, поскольку функциональность такой системы определяется программным обеспечением, выполняемым на программируемом оборудовании.

Мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов (OFDM) активно применяется в беспроводных (например, 4G LTE, Wi-Fi) и, в меньшей степени, проводных системах связи. OFDM обладает рядом преимуществ, таких как устойчивость к многолучевому распространению, повышенная устойчивость к помехам, эффективное использование спектра, устойчивость к эффекту выборки по частоте, поддержка множества входов и выходов (MIMO) и адаптивные схемы модуляции и кодирования. В данном исследовании осуществляется оценка эффективности и преимущества использования OFDM для передачи данных [1-3].

Реализация OFDM на реальном оборудовании с использованием концепций программно-определяемой радиосвязи (SDR) и оценка ее производительности с применением различных методов канальной оценки практически не были исследованы. Благодаря большой гибкости систем SDR, внедрение и экспериментирование с системами OFDM становятся более доступными и менее затратными по сравнению с полной аппаратной реализацией. В данной работе была разработана специализированная

испытательная платформа на основе программного обеспечения GNU Radio для тестирования SDR.

На нашей испытательной платформе, предназначенной для исследования производительности новых систем OFDM, была реализована предварительная модель канала связи OFDM с использованием симуляции радиоканала и реального радиоканала на основе SDR для передачи цифровых данных.

В данном случае, универсальные программные приемо-передатчики (LimeSDR и HackRF One) использовались для обработки радиочастоты, а GNU Radio – для цифровой обработки сигнала. GNU Radio является программной платформой радиоархитектуры с открытым исходным кодом, написанной на C++ и использующей Python для создания блоков системы [2].

Разработанная испытательная платформа может быть использована для проверки передовых методов обработки сигналов в системах с OFDM путем разработки программного обеспечения без необходимости в сложных аппаратных разработках.

1. Сущность OFDM

Схема модуляции с несколькими несущими основана на разделении последовательного потока данных на группу параллельных субканалов, которые передаются одновременно на ортогональных поднесущих. Это обеспечивает независимую передачу каналов без взаимного влияния. Для этого используется блок последовательно-параллельного преобразователя (ППП), показанный на рис. 1. Каждая поднесущая модулируется по обычной схеме модуляции с низкой символьной скоростью, сохраняя общую скорость передачи данных, как и у схем модуляции с одной несущей в той же полосе пропускания. При передаче данных применяется обратное дискретное преобразование Фурье (ОДПФ) с использованием цифро-аналогового преобразователя (ЦАП), которое обеспечивает ортогональность субканалов. Количество поднесущих выбирается таким образом, чтобы оно было кратным размерностям массивов 2^k , поскольку ОДПФ эффективно работает с массивами такой размерности.

Количество поднесущих N обычно находится в диапазоне (128...2048), в зависимости от ширины канала. На практике наиболее часто используется 512 поднесущих для 5 МГц или 1024 поднесущих для 10 МГц. На приемнике блоки схемы инвертируются, используя прямое дискретное преобразование Фурье (ДПФ) и аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Типичная схема системы с OFDM приведена на рис. 1.

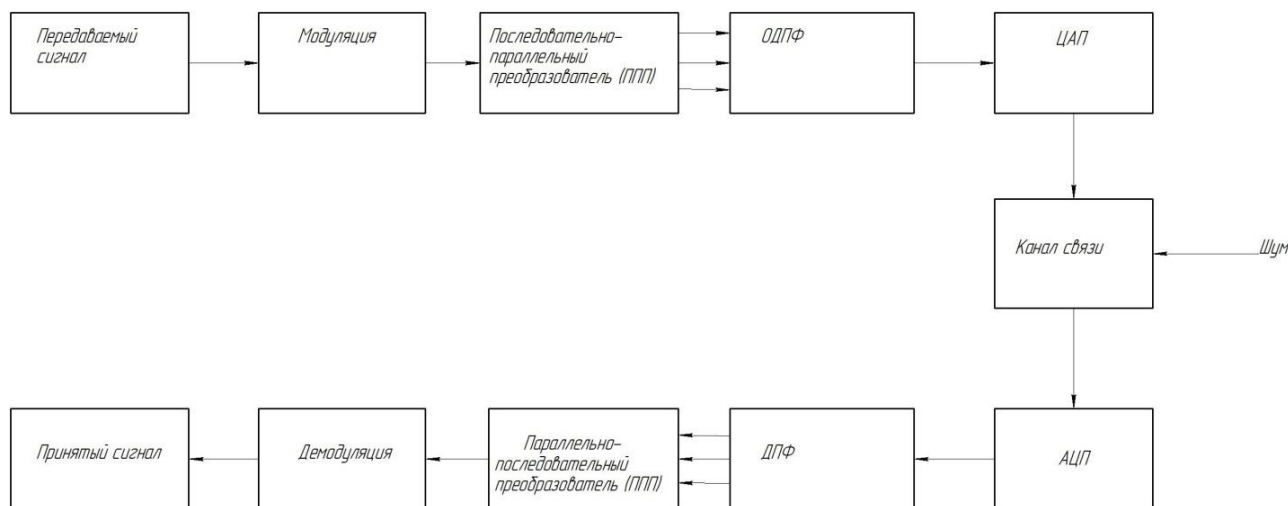


Рис. 1. Структурная схема системы с OFDM.

Пример работы ППП:

каждый n -й символ (по числу каналов) мы переносим на соответствующий ему канал (рис. 2).

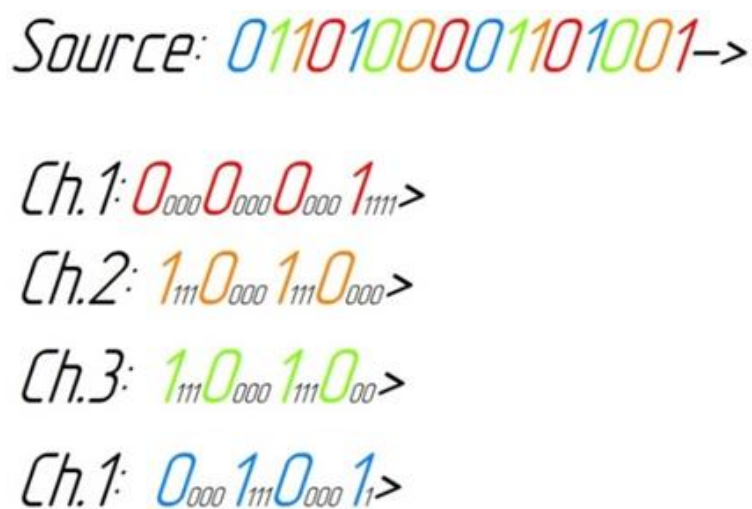


Рис. 2. Последовательно-параллельный преобразователь.

Каждый последующий канал сдвинут по фазе на $1/4$ периода. Такое разнесение информации по нескольким каналам позволяет увеличить период информационного символа и, соответственно, уменьшить влияние помех на информацию [3].

Использование сигналов с OFDM в системах передачи информации позволяет увеличить информационную емкость системы при ограниченной полосе пропускания, а также повысить скорость приема-передачи данных, приближая ее к пропускной способности канала, и обеспечить улучшенную скрытность передачи и помехоустойчивость системы [4]. При правильной параметризации, когда сигнал OFDM передается через канал с частотно-селективным замиранием, каждая поднесущая может испытывать только плоское замирание. Однако эти каналы могут исказить принятый сигнал из-за межсимвольных помех (ISI) и перекрестных помех между сигналами, поступающими с различными задержками. Для решения этой проблемы в OFDM используется циклический префикс (CP), который представляет собой копию последней части символа и добавляется перед каждым символом. CP предотвращает размывание задержек в канале (рис. 3). Кроме того, CP используется для синхронизации, сохранения ортогональности поднесущих и внесения циклической свертки между передаваемым сигналом и импульсной характеристикой канала, что упрощает приемник.

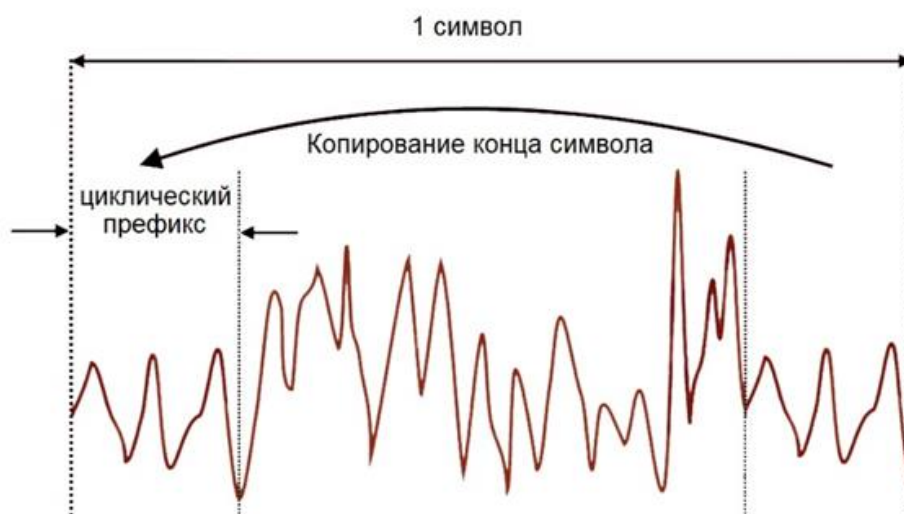


Рис. 3. Добавление циклического префикса.

2. Преимущества и недостатки OFDM

В настоящее время OFDM широко применяется в системах высокоскоростной передачи данных. Благодаря высокой спектральной эффективности и устойчивости к многолучевому распространению, сигналы OFDM активно внедряются в различные системы. Среди известных областей, где применяется OFDM, в настоящее время наиболее распространены LTE, 4G, WiMAX, IEEE 802.11, Wi-Fi, цифровое телевидение, а также применение OFDM в 5G [5].

Для разработки эффективных систем связи необходимо глубокое понимание характеристик многолучевого распространения в городской среде. Когда радиоволны достигают приемной антенны по нескольким путям, включая прямой сигнал и отраженные лучи, возникает межсимвольная интерференция, которая искажает сигналы друг другом. Это приводит к серьезному ухудшению характеристик системы, качества передачи высокоскоростной цифровой информации и потере некоторых битов. Особенно сильное влияние оказывает межсимвольная интерференция, когда временная задержка между принимаемыми сигналами превышает длительность одного символа. Восстановление исходного сигнала становится затруднительным, так как амплитуда и фаза сигнала изменяются для различных символов.

Опишем более подробно некоторые приемы, используемые для повышения помехоустойчивости и корректного приема сигналов. Эти приемы включают использование ортогональных поднесущих частот, применение защитного интервала в битовой последовательности и особый метод синхронизации сигналов [6]. Увеличение длительности передаваемых сигналов достигается путем распределения информационного потока на множество ортогональных поднесущих. Это позволяет увеличить скорость передачи данных и уменьшить влияние межсимвольной интерференции.

Ширина спектра используемых частот является одним из важнейших требований в беспроводных коммуникационных системах. Использование ортогональных поднесущих позволяет использовать несколько частотных поднесущих с узким суммарным спектром, что устраняет необходимость

в широком спектре, требуемом при использовании неортогональных поднесущих. Сужение суммарного спектра достигается за счет частичного перекрытия соседних поднесущих и выравнивания максимумов каждого поднесущего с минимумами боковых лепестков соседних поднесущих. Этот метод сужения спектра не приводит к потерям и искажениям. Ортогональность гарантирует независимость частот поднесущих друг от друга и, следовательно, отсутствие межканальной интерференции.

В последнее время активно применяются технологии передачи данных по электрической сети (Power Line Communication, PLC) с использованием OFDM, так как это существенно увеличивает пропускную способность канала связи. PLC-технологии могут быть реализованы в различных вариантах:

- 1) широкополосные (с шириной спектра (2...30) МГц) со скоростью передачи данных (2...200) Мбит/с и выше;
- 2) узкополосные ((3...500) кГц) со скоростью до 128 Кбит/с и более.

Использование большего числа поднесущих значительно увеличивает скорость передачи данных по сравнению с методом частотной ключевой модуляции (FSK). Результаты сравнительных испытаний систем FSK и OFDM (PLC G3) представлены в таблице 1 [7]. Эти результаты позволяют сделать вывод о том, что OFDM обрабатывает и считывает данные значительно быстрее, чем FSK.

Таблица 1. Результаты сравнительных испытаний FSK- и OFDM-систем.

Вид модуляции	Время считывания массива данных объемом 3300 байт, с
S-FSK 1200	56
S-FSK 2400	28
OFDM	4

Устойчивость к многолучевому распространению заключается в наложении копий исходного сигнала с разными амплитудами и задержками, что отрицательно сказывается на передаче данных. В результате некоторые несущие частоты «разрушаются» в спектре сигнала. Однако благодаря передаче на нескольких поднесущих, а не на одной, теряется лишь часть потока данных,

которую можно восстановить. Существуют различные методы для восстановления этой части [8], включая:

- 1) Метод регуляризации Тихонова.
- 2) Итерационный метод на базе быстрого преобразования Фурье (БПФ).
- 3) Градиентный метод, использующий обучение по прецедентам.
- 4) Метод расчета обратного оператора.

Однако эти методы являются сложными и трудоемкими. Хотя есть возможность восстановления потока данных, более эффективным подходом является использование описанных выше приемов для повышения помехоустойчивости сигнала и его корректного приема.

Для компенсации искажений сигнала, вызванных многолучевым распространением и интерференцией от предыдущих символов, вводятся защитные интервалы. Длительность этих интервалов сокращается за счет уменьшения скорости передачи информации и составляет $1/4$ от длительности полезного символа. Для правильной демодуляции сигналов, приемное устройство должно обрабатывать принятый сигнал во время полезного периода, а не защитного интервала. Для этого используется сигнал синхронизации, который представляет собой последовательность дискретных импульсов с постоянной частотой. Узкополосное ослабление сигнала оказывает незначительное влияние на большое количество субканалов, поэтому OFDM-модуляция обеспечивает высокую скорость передачи данных и устойчивость к помехам, связанным с провалами в спектре передаваемых сигналов. Ортогональность используемых поднесущих позволяет применять быстрое преобразование Фурье (БПФ) и обратное БПФ (ОБПФ), что упрощает аппаратную реализацию алгоритмов модуляции [9].

Один из существенных недостатков OFDM – высокий пик-фактор, обладающий следующими последствиями:

- 1) Требуется использование передающих устройств с усилителями мощности (УМ), обладающими широким линейным динамическим диапазоном, поскольку OFDM радиосигнал содержит множество кратковременных пиков.

2) Возникают внутриполосные и внеполосные искажения из-за ограничений сигнала, если выбросы происходят с достаточной частотой в усилителе. Это усложняет или в некоторых случаях делает невозможной демодуляцию сигнала на приемной стороне.

3. Экспериментальное исследование помехозащищенности канала

Эксперимент проводится с целью исследования помехозащищенности канала с применением OFDM модуляции для передачи цифровых данных. Реализация канала связи OFDM осуществляется с использованием программного средства GNU Radio и SDR-устройств LimeSDR и HackRF One. Выбор GNU Radio обусловлен его открытым исходным кодом, позволяющим настраивать параметры передачи данных на персональном компьютере и обеспечивать глубокий анализ сигнала. Каждое SDR-устройство подключается через USB к персональному компьютеру, который выполняет функции передатчика или приемника для системы OFDM. LimeSDR и HackRF One представляют собой платформы для реализации SDR и обладают ЦАП, АЦП, антеннами MIMO и радиочастотными чипами для приема и передачи сигналов [10-11]. Схематичное представление испытательного стенда приведено на рисунке 4.

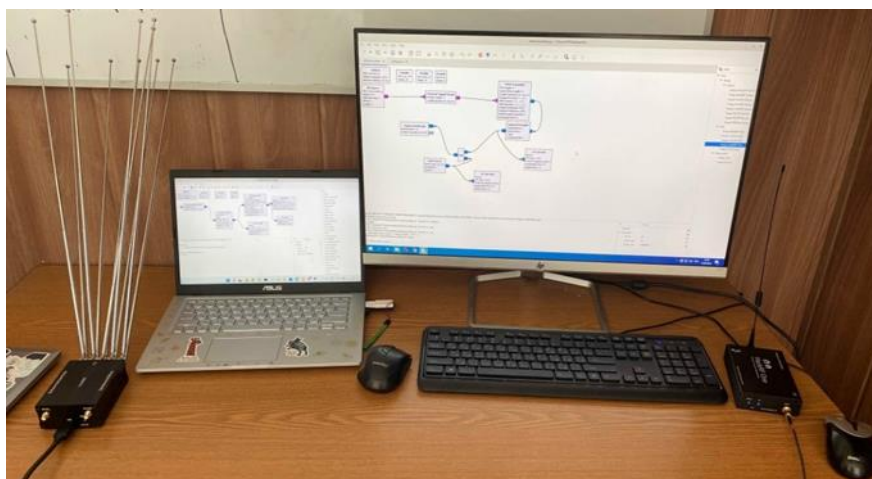


Рис. 4. Испытательный стенд с использованием LimeSDR и HackRF One.

3.1 Система с имитацией радиоканала

Для проведения испытаний с использованием GNU Radio и цифровой обработки сигнала на компьютере разрабатывается программное обеспечение на языке программирования Python. Блоки программы работают на языках C++ или Python, и мы выбираем второй вариант в связи с его более простым изучением и доступностью как бесплатной платформы.

В качестве исходной информации используется поток цифровых данных, который подается на вход программы. Затем этот поток записывается в текстовый файл (рис. 5), который будет передаваться с использованием OFDM.

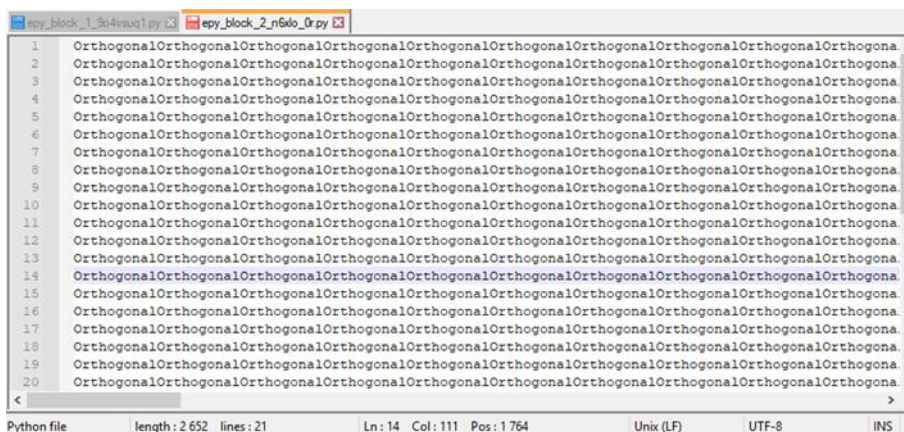


Рис. 5. Передаваемый текстовый файл.

После чего ограничивается скорость подачи отсчетов потока до требуемой частоты дискретизации, обычный поток преобразуется в поток с вставленными тегами, имеющими фиксированную длину и размещенными в регулярных временных интервалах. Далее цифровые данные передаются на OFDM-передатчик, где они разделяются на параллельные потоки с помощью ППП, использующего ОДПФ вместо блока квадратурных модуляторов. Пример такого преобразования показан на рисунке 6 [12-13]. В программе настраиваются параметры, такие как количество поднесущих, длина циклического префикса, занятые несущие OFDM символами данных (`occupied_carriers`) или пилотными символами (`pilot_carriers`) и т.д.

```

self.digital_ofdm_tx_0_0 = digital.ofdm_tx(
    fft_len=fft_len,
    cp_len=fft_len//4,
    packet_length_tag_key='len_tag_key',
    occupied_carriers=((-4,-3,-2,-1,1,2,3,4)),
    pilot_carriers=((-6,-5,5,6)),
    pilot_symbols=((-1,1,-1,1)),
    sync_word1=None,
    sync_word2=None,
    bps_header=1,
    bps_payload=2,
    rolloff=0,
    debug_log=False,
    scramble_bits=False)

```

Рис. 6. Пример скрипта блока OFDM передатчика для модуляции сигнала.

На вход поступает поток байтов (unsigned char), а на выходе получается сложно-модулированный сигнал в основной полосе частот. Сначала применяется BPSK (двоичная фазовая манипуляция) для передачи одного бита на символ, а затем QPSK (квадратурная фазовая манипуляция) для увеличения скорости передачи данных. Далее спектр сигнала визуализируется (рис.7) и выводится на монитор экрана. В целях исследования помехозащищенности канала, мы имитируем помехи и добавляем их к модулированному сигналу.

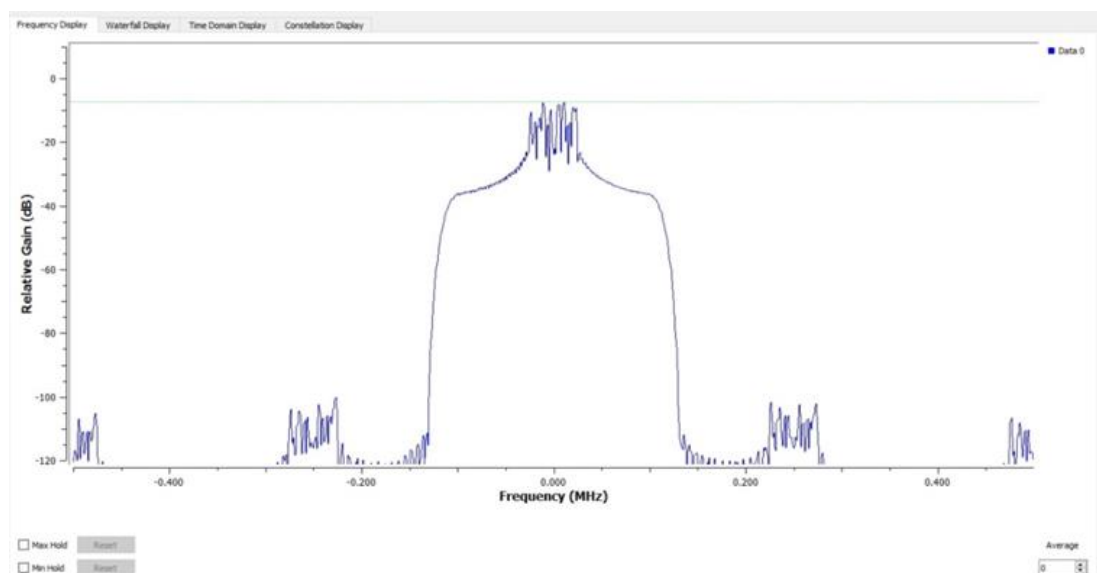


Рис. 7. Визуализация спектра передатчика OFDM.

Модулированный сигнал подается на ЦАП для преобразования сигнала из цифрового формата в аналоговый. Затем аналоговый сигнал подается на симулированный канал связи, так как мы имитируем передачу и прием

сигнала внутри компьютера. Симулятор модели канала используется для оценки, проектирования и тестирования различных сигналов, осциллограмм и алгоритмов. Сигнал затем проходит через АЦП для преобразования аналогового сигнала обратно в цифровой формат. С использованием ДПФ и ППП, множество параллельных потоков восстанавливаются в исходный поток, и сигнал демодулируется на приемнике OFDM, выделяя информационный (модулирующий) сигнал.

В конце цикла цифровые данные выводятся в консоль. Для их приема используется дополнительная программа, которую необходимо записать, сохранить как файл и запустить в терминале, чтобы данные, то есть содержимое файла, который мы передавали, выводились в этом терминале.

3.2 Система с реальным радиоканалом на основе HackRF и LimeSDR

Используется передающая часть из предыдущего пункта до симулятора канала без ограничения скорости подачи отсчетов потока до требуемой частоты дискретизации, так как мы устанавливаем связь между HackRF и LimeSDR. Когда модулированный сигнал подается на ЦАП, преобразованный аналоговый сигнал передается на LimeSDR для его передачи. Настраиваем несколько параметров SDR, таких как частота дискретизации, полоса пропускания, несущая частота, усиление канала и другие. Для приема сигнала мы используем приемник HackRF и задаем соответствующие параметры HackRF для приема нашего сигнала. Затем применяется аналогичная схема для приема и выводим полученные цифровые данные в консоль с помощью дополнительной программы. Скрипты для программирования LimeSDR и HackRF представлены на рисунках 8 и 9 соответственно.

```
self.soapy_limesdr_sink_0 = soapy.sink(dev, "fc32", 1, '',
                                     stream_args, tune_args, settings)
self.soapy_limesdr_sink_0.set_sample_rate(0, samp_rate)
self.soapy_limesdr_sink_0.set_bandwidth(0, 0.0)
self.soapy_limesdr_sink_0.set_frequency(0, 433.075e6)
self.soapy_limesdr_sink_0.set_frequency_correction(0, 0)
self.soapy_limesdr_sink_0.set_gain(0, min(max(20.0, -12.0), 64.0))
```

Рис. 8. Программа для передатчика LimeSDR.

```
self.soapy_hackrf_source_0 = soapy.source(dev, "fc32", 1, '',
                                         stream_args, tune_args, settings)
self.soapy_hackrf_source_0.set_sample_rate(0, 1e6)
self.soapy_hackrf_source_0.set_bandwidth(0, 0)
self.soapy_hackrf_source_0.set_frequency(0, 433.075e6)
self.soapy_hackrf_source_0.set_gain(0, 'AMP', False)
self.soapy_hackrf_source_0.set_gain(0, 'LNA', min(max(16, 0.0), 40.0))
self.soapy_hackrf_source_0.set_gain(0, 'VGA', min(max(16, 0.0), 62.0))
```

Рис. 9. Программа для приемника HackRF.

Некоторые технические характеристики LimeSDR и HackRF приведены в таблице 2.

Таблица 2. Технические характеристики LimeSDR и HackRF.

Устройство	Диапазон частот	Полоса частот	Разрядность АЦП/ЦАП	Количество каналов на прием/передачу
LimeSDR	100 кГц...3,8 ГГц	61,44 МГц	12 бит	2/2
HackRF	1 МГц...6 ГГц	20 МГц	8 бит	1/1

Система была сконфигурирована с несущей частотой 3,6 ГГц, полосой пропускания 1 МГц и частотой дискретизации 2 МГц. Помехи использовались в диапазоне частот 433,075 МГц, который совпадает с диапазоном приема-передачи сигнала. Декодированная информация сохраняется в файле, или выводится в консоль, как показано на рисунке 10.

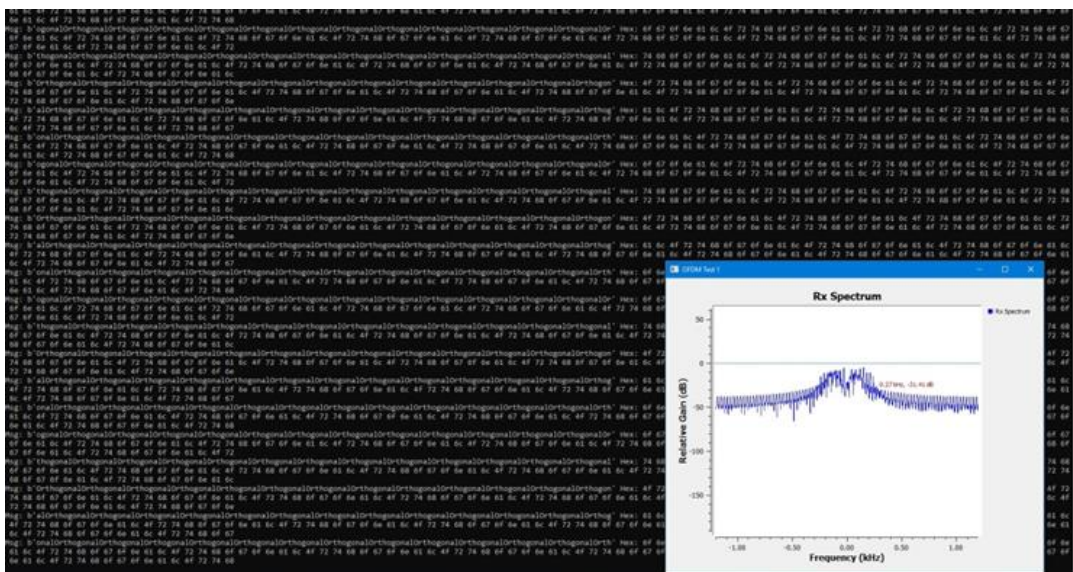


Рис. 10. Вывод полученных данных в консоль.

Демодулятор преобразует сигнал в бинарный код, и на выходе получается последовательность в формате «4f 72 74 68 6f 67 6f 6e 61 6c...». Этот код представляет шестнадцатеричное представление символов ASCII, и при переводе дается исходный текстовый файл. Заметим, что в данном случае каждый последующий канал сдвинут по фазе на $1/6$ периода, что программируется в блоке OFDM передатчика и приемника.

Данная модель системы с приемо-передачей OFDM используется в беспроводных системах связи, таких как LTE, 4G, Wi-Fi и др., поскольку позволяет параллельное разделение абонентов без взаимодействия между ними. В данном эксперименте целью было продемонстрировать возможность передачи цифровых данных по воздуху на небольшом расстоянии с использованием преимуществ OFDM, таких как помехозащищенность и устойчивость к многолучевому распространению. Отметим, что на практике не была подробно описана передача данных по воздуху с использованием именно этого типа модуляции. В эксперименте мы передаем пакет данных с одного компьютера на другой и добавляем помехи для проверки помехозащищенности OFDM модуляции, таким образом получая наши данные без повреждений.

Заключение

В ходе эксперимента была реализована система OFDM на реальном оборудовании с использованием программно-определяемой радиосвязи (SDR). Проверена производительность системы с использованием различных методов оценки канала на практике. Разработан специальный стенд на основе программной платформы GNU Radio для тестирования OFDM системы, который включал предварительную модель канала связи OFDM с симуляцией радиоканала и использованием реального радиоканала на базе SDR с программными приемопередатчиками LimeSDR и HackRF One для радиочастотной обработки и GNU Radio.

Результаты эксперимента подтвердили помехоустойчивость системы OFDM при передаче данных без повреждений и способность расшифровать

информационные пакеты. Система обладает мобильностью, не требует дорогостоящего оборудования и имеет гибкость аппаратной части. В зависимости от конечной цели, систему можно упростить в приемной части, заменив HackRF более доступным и экономичным оборудованием RTL-SDR. Данная модель может быть применена для дальнейшего исследования применения OFDM-модуляции в проводных технологиях.

В дальнейшем планируется работа с новыми системами на основе технологии SDR и усовершенствование системы OFDM. Созданный стенд может служить основой для исследования улучшенных систем связи и алгоритмов передачи данных. Предварительные результаты эксперимента показывают, что SDR обеспечивает большую гибкость при проектировании и тестировании систем связи с учетом реальных условий канала и помех на интерфейсе.

Анализ бинарного кода каждой строки показал смещение на $1/6$ периода без потери данных, что свидетельствует о помехоустойчивости сигнала с OFDM-модуляцией и ее преимуществах при передаче данных с высокой скоростью. Это подтверждает применимость OFDM-модуляции в беспроводных системах связи, таких как LTE, 4G, Wi-Fi и других, где требуется эффективная передача данных.

Использование GNU Radio и универсальных программных приемопередатчиков Lime SDR и HackRF One обеспечивает гибкость и универсальность системы, позволяя настраивать различные параметры передачи и приема сигнала. Это открывает возможности для дальнейшего исследования и разработки улучшенных систем связи на основе SDR и OFDM.

Таким образом результаты эксперимента подтверждают эффективность и гибкость системы OFDM на основе SDR при передаче данных. Дальнейшее исследование и разработка улучшенных систем связи, а также оптимизация использования OFDM-модуляции в проводных технологиях, могут привести к расширению применения этой технологии и улучшению производительности

коммуникационных систем. Более детальное исследование новых систем на основе технологии SDR позволит развить и улучшить систему OFDM.

Выводы данного исследования подчеркивают значимость OFDM-модуляции в области беспроводных связей, а также ее применимость в широком спектре технологий, включая LTE, 4G, Wi-Fi и другие, где требуется эффективная передача данных. Использование GNU Radio и универсальных программных приемопередатчиков LimeSDR и HackRF One предоставляет возможность гибкого проектирования и тестирования систем связи с учетом реальных условий канала и помех на интерфейсе.

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания (тема № АААА-А12-2110800012-0).

Литература

1. Кусайкин Д. Просто о сложном: OFDM-модуляция: [Электронный ресурс]. URL: <https://nag.ru/material/30600> (дата обращения: 30.05.2023)
2. Использование сигналов OFDM (мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов, которая использует большое количество близко расположенных ортогональных поднесущих) в беспроводной связи: [Электронный ресурс]. URL: <https://hub.exponenta.ru/post/ispolzovanie-signalov-ofdm-multipleksirovanie-s-ortogonalnym-chastotnym-razdeleniem-kanalov-kotoraya-ispolzuet-bolshoe-kolichestvo-blizko-raspolozhennykh-ortogonalnykh-podnesushchikh-v-bespro> (дата обращения: 30.05.2023)
3. OFDM – технология цифровой модуляции в сетях WiMax и LTE: [Электронный ресурс]. URL: <https://habr.com/ru/company/yota/blog/119319/> (дата обращения: 30.05.2023)
4. Ковалев В.В., Селецкая О.Ю., Покаместов Д.А. Формирование и обработка OFDM сигналов // Молодой ученый. – 2016. – №. 14. – С. 151-154.

5. Шорин О.А., Бокк Г.О. Эквалайзер для коррекции мультидоплеровских искажений OFDM сигналов в сетях LTE и McWILL //Сборник материалов (тезисов). – 2016. – С. 4.
6. Кот М.А., Катц А.А., Горбина Е.В. Применение OFDM-модуляции //EUROPEAN RESEARCH. – 2016. – С. 111-114.
7. Охрименко В. Узкополосная PLC-технология: OFDM-модуляция //Время Электроники. – 2010. – №. 9. – С. 42.
8. Юзькив Р.Р. и др. Исследование эффективности восстановления КАМ-символов неполной длительности в OFDM-сигнале //Компьютерная оптика. – 2020. – Т. 44. – №. 1. – С. 60-66.
9. Мамчев Г.В. Основы радиосвязи и телевидения. – 2006.
10. Quispe J.L., Ruiz J.T., Meloni L. An SDR implementation of an OFDM transmitter and receiver in GNU Radio. – 2017.
11. Anjana C. et al. An experimental study on channel estimation and synchronization to reduce error rate in OFDM using GNU radio //Procedia Computer Science. – 2015. – Т. 46. – С. 1056-1063.
12. GNU Radio Wiki: [Электронный ресурс]. URL: <https://wiki.gnuradio.org/> (дата обращения: 30.05.2023)
13. Делаем модем: передаем цифровые данные по воздуху с помощью OFDM и GNU Radio: [Электронный ресурс]. URL:<https://habr.com/ru/post/497638/> (дата обращения: 30.05.2023)

Для цитирования:

Ганигин С.Ю., Нечаев А.С., Киященко В.В., Голубева М.М., Журавлева Е.С. Применение технологии SDR для повышения помехозащищенности: экспериментальное исследование канала с OFDM модуляцией в GNU RADIO. // Журнал радиоэлектроники. – 2023. – №. 11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.11.2>