

Электронный научный журнал "Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках" <http://mathmod.esrae.ru/>

URL статьи: [mathmod.esrae.ru/51-214](http://mathmod.esrae.ru/51-214)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Горбачев Д.В., Протасов В.А., Дорошенко В.М., Киркица В.А. Применение программно-определяемого радио HackRF One для исследования радиочастот // Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках. 2025. №3

УДК 532.517.2:539.3

DOI:10.24412/2541-9269-2025-3-27-37

## ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНО-ОПРЕДЕЛЯЕМОГО РАДИО HACKRF ONE ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИОЧАСТОТ

Горбачев Д.В.<sup>1</sup>, Протасов В.А.<sup>2</sup>, Дорошенко В.М.<sup>3</sup>, Киркица В.А.<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,  
Россия, Саратов, [danilgorb03@mail.ru](mailto:danilgorb03@mail.ru)

<sup>2</sup> Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,  
Россия, Саратов, [vladimir.protasov24@mail.ru](mailto:vladimir.protasov24@mail.ru)

<sup>3</sup> Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,  
Россия, Саратов, [dorvalentina9@gmail.com](mailto:dorvalentina9@gmail.com)

<sup>4</sup> Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,  
Россия, Саратов, [skrks@mail.ru](mailto:skrks@mail.ru)

## APPLICATION OF SOFTWARE-DEFINED RADIO HACKRF ONE FOR RADIO FREQUENCY RESEARCH

Gorbachev D.V.<sup>1</sup>, Protasov V.A.<sup>2</sup>, Doroshenko V.M.<sup>3</sup>, Kirkitsa V.A.<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Russia,  
Saratov, [danilgorb03@mail.ru](mailto:danilgorb03@mail.ru)

<sup>2</sup> Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Russia,  
Saratov, [vladimir.protasov24@mail.ru](mailto:vladimir.protasov24@mail.ru)

<sup>3</sup> Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Russia,  
Saratov, [dorvalentina9@gmail.com](mailto:dorvalentina9@gmail.com)

<sup>4</sup> Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Russia,  
Saratov, [skrks@mail.ru](mailto:skrks@mail.ru)

**Аннотация.** В статье представлено описание характеристик устройства SDR HackRF One. В первой части статьи проведен анализ функциональных возможностей данного устройства, предложены меры предосторожности при использовании SDR HackRF One. Во второй части представлено исследование возможностей программно-определяемого радио SDR HackRF One для передачи сигналов с частотной и амплитудной модуляцией. В работе рассматриваются принципы работы HackRF One, его аппаратные и программные возможности.

Ключевые слова: SDR, GNURadio, HackrfOne, частотная модуляция, амплитудная модуляция.

**Abstract.** The article provides a description of the characteristics of the SDR HackRF One

device. The first part of the article analyzes the functional capabilities of this device and proposes safety precautions for using the SDR HackRF One. The second part presents a study of the capabilities of the software-defined radio SDR HackRF One for transmitting frequency-modulated signals. The work examines the operating principles of the HackRF One, as well as its hardware and software capabilities.

Keywords: SDR, GNURadio, HackrfOne, frequency-modulated, amplitude modulation.

Одним из последних достижений в сфере радиопередачи является Software Defined Radio (SDR) или программно определяемая радиосистема. Основными отличительными особенностями SDR являются передача широкополосного сигнала с приемника на ПК (ширина обрабатываемой полосы от 48 кГц до 50 МГц, что определяется достижимыми на данный момент параметрами компьютеров, то есть возможностями звуковой карты и применением сверхбыстрого АЦП с передачей сигнала по Gigabit Ethernet или USB3.0) и демодуляция сигнала математическими алгоритмами.

Характеристики будущей радиоволны генерируются на компьютере, после формирования в компьютерной программе сигнал отправляется на внешнюю плату, чтобы в дальнейшем быть переданным в качестве радиоволны [1].

### Преимущества перед аналоговыми устройствами

Благодаря применению SDR-технологии возможно достичь большую гибкость в работе по сравнению с привычными аналоговыми устройствами формирования/демодуляции радиосигналов.

Можно выделить три этапа развития SDR-технологии. Первые SDR на базе звуковой карты. На сегодняшний день это самая старая модель на рынке, данный SDR передает сигнал на линейный вход по аудио кабелю, оцифровка же происходит на компьютере. Левый канал используется в качестве синфазного канала, правый – в качестве квадратурного канала, благодаря этому отсутствует необходимость в установке дополнительных драйверов. SDR определяется операционной системой компьютера как звуковая карта, но для приема радиосигналов требуется установка специализированного программного обеспечения.

На втором этапе появились SDR со встроенным АЦП. Такой тип SDR преобразует принятый аналоговый сигнал в цифровой вид для его последующей обработки на компьютере.

Третим этапом считается SDR со встроенным сверхбыстрым АЦП. Данный тип SDR имеет частоту семплирования входного аналогового сигнала порядка 100 млн семплов/с, что позволяет иметь ширину полосы пропускания, равную половине частоты дискретизации (согласно теореме Котельникова/Шеннона).

SDR переводит на новый уровень оборудование, которое раньше имело только аппаратную реализацию и нерегулируемую аппаратуру, в программно-определяемое [2].

Платформа SDR предоставляет широкие возможности по

конфигурированию параметров и режимов работы. К примеру, для прослушивания радио эфира на определенной частоте достаточно выбрать несущую частоту и смешать её с входным сигналом, остальные преобразования выполняются программным обеспечением.

Цель применения SDR-технологии заключается в получении аналогового сигнала, преобразования его в цифровой вид и передаче на компьютер для последующей обработки. Для этого сигнал должен пройти процедуру дискретизации и квантования.

Для работы с SDR традиционно используется программа GNU Radio Companion. Это программное обеспечение имеет интерфейс, алгоритмы в котором реализуются посредством соединения блоков, выполняющих заданные функции (например, функции модуляции/демодуляции) [2]. В GNU Radio Companion также предусмотрена возможность декодирования входных сигналов. Результат декодирования будет выводиться в нижнюю часть интерфейса программы (рис.1).

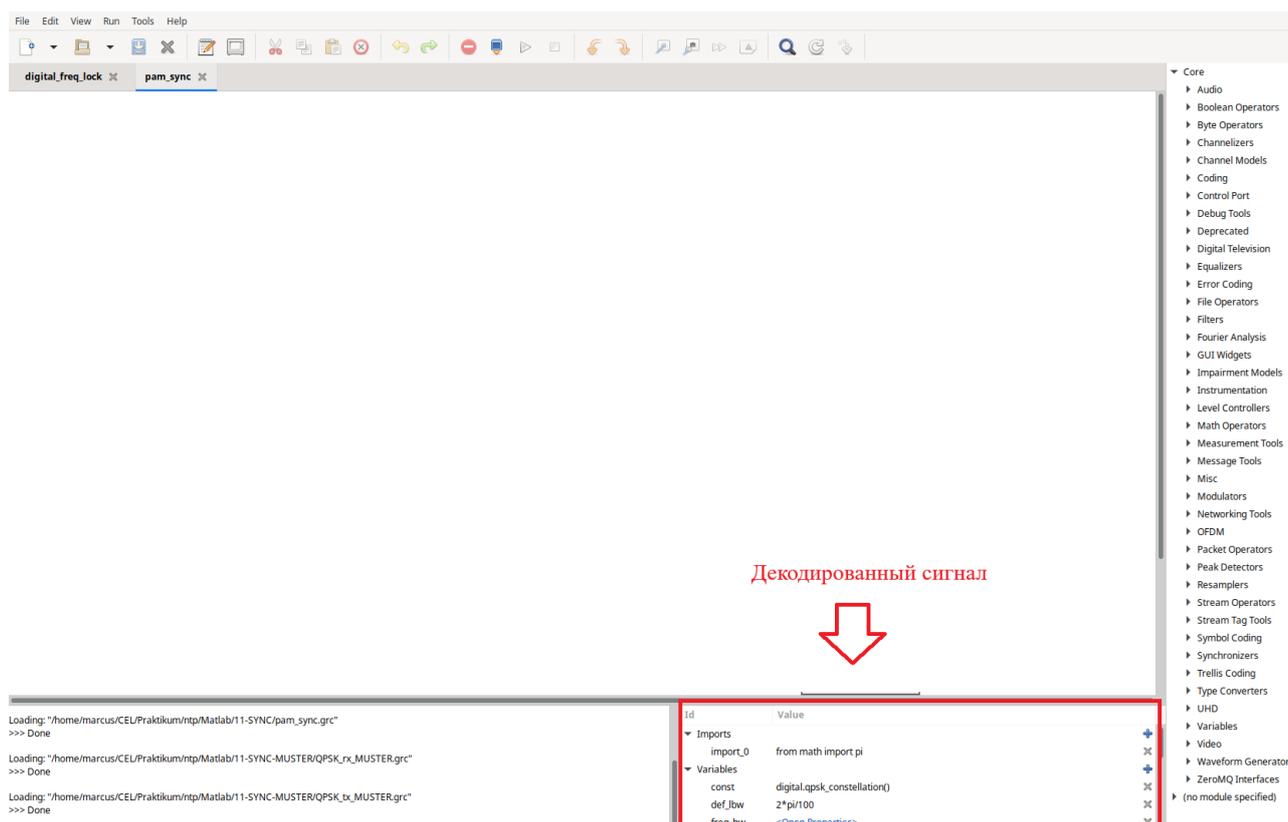


Рис. 1. Пример интерфейса GNU Radio Companion с выводом декодированного сигнала.

GNU Radio является открытым и свободно распространяемым программным продуктом, который обеспечивает цифровую обработку сигналов в научных, образовательных или коммерческих целях. Система состоит из большого числа готовых блоков, имеющих интерфейс на языке

Python, сами блоки написаны на C++. В GNU Radio входит также визуальный редактор GNU Radio Companion, позволяющий визуально соединять блоки в готовое «устройство», не прибегая к классическому программированию.

Формально HackRF может передать что угодно в пределах своей полосы пропускания, например зная протокол передачи данных, можно рулить радиоуправляемой машинкой или управлять дверным звонком. Для примера в статье приведено рассмотрение частотной (FM) и амплитудной (AM) модуляции.

### Применение HackRF One для анализа радиосигналов

При выполнении данной работы было выбрано устройство HackRF One. Выбор данной платформы HackRF One для анализа радиосигналов обусловлен ее относительной дешевизной и сочетанием большого спектра возможностей. Можно сказать, что HackRF One— это платформа Software Defined Radio с открытым исходным кодом [3]. Устройство является полудуплексным трансивером. Основные технические характеристики HackRF One представлены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики HackRF One

Диапазон частот	1МГц÷6 ГГц	Частоты дискретизации	8÷20Msps
Ширина полосы пропускания:	20 МГц;	Программно-контролируемая мощность порта антенны	50mA на 3.3V
Количество бит на входе/выходе	бит	Штырьевой разъем для подключения дополнительных плат	+
Гнездо антенны	SMA-female	Интерфейс хоста	USB2.0
Мощность передатчика	30мВт	Совместимость с операционными системами	Windows, Linux, Mac

К недостаткам данного устройства можно отнести низкоскоростной интерфейс USB2.0, так непосредственно определяет верхнюю границу диапазона частот, ширину полосы захвата 20 МГц, дальность передачи сигнала не более 50 м при помощи встроенного передатчика. Для передачи сигнала на большее расстояние необходимо дополнительно приобретать специальный усилитель. Однако, можно выделить и ряд ключевых преимуществ, таких как, например доступность и низкая цена, возможность приема аналоговых сигналов любой формы, открытые исходные коды программного обеспечения, совместимость с большинством компьютеров и операционных систем.

### Описание работы

Устройство HackRF One на плате имеет шесть индикаторов, сигнализирующих о текущих режимах работы (рис. 2.).

Индикаторы «3V3», «1V8», «RF» отвечают за элементы питания схемы. При активной работе HackRF One все индикатора должны работать. Если один из них не работает, это значит, что в схеме имеется проблема, которую стоит



Рис. 2. Внешний вид боковой панели HackRF One с индикаторами

устранить. Индикаторы могут отключаться при включении режима экономии энергии; 1V8 и RF отключаются, если HackRF One находится в режиме сна. Индикатор «USB»—указывает на то, что компьютер взаимодействует с HackRF One как с USB- устройством. Индикатор «RX» показывает операцию приёма данных, «TX»—операцию передачи данных; Индикаторы «USB», «RX», «TX» находятся под управлением программного обеспечения. Имеется возможность установить пользовательскую прошивку и переназначить функции индикаторов.

Также устройство оснащено двумя кнопками «RESET» —перезагрузка микроконтроллера и «DFU»— режим обновления прошивки. Основная функция кнопки «DFU» это вывод устройства из состояния покоя или восстановления прошивки после неудачной установки программного обеспечения. Кнопка функциональна только при включении устройства или нажатии кнопки «RESET».

При работе с HackRF One необходимо соблюдать меры, направленные на безопасность пользователя и устройства. Не допускается запуск приёма/передачи сигналов без подключённой антенны. При приеме/передаче данных без подключенной антенны существует риск выходаустройства из строя. В бес корпусном варианте изготовления HackRF One возможно короткое замыкание при контакте платы с металлической поверхностью.

### Реализация сигнала

Для реализации передачи сигнала в режиме частотной модуляции (FM) необходимо запустить среду разработки GNU Radio Companion и построить в программе соответствующий граф (рис. 3).

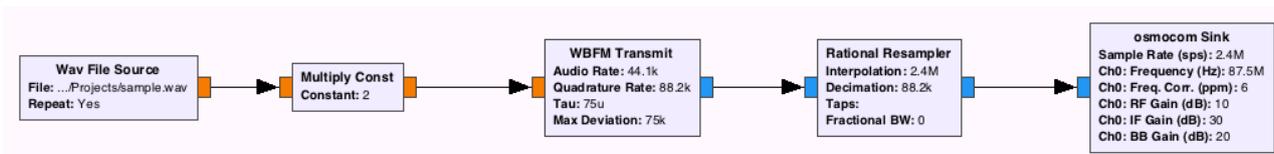


Рисунок 3. Граф частотной модуляции.

Структура предложенного решения отличается простотой. В качестве источника сигнала был использован WAV-файл с частотой дискретизации 44,1 кГц. Блок MultiplyConst применяется для усиления сигнала путем умножения на коэффициент 2, что обусловлено низким уровнем громкости исходного аудиофайла. Последующий блок WBFM Transmit выполняет ключевое преобразование, переводя вещественный сигнал с частотой дискретизации 44,1 кГц в комплексный сигнал с частотой дискретизации 88,2 кГц. Далее блок Resampler увеличивает частоту дискретизации до 2,4 МГц, что соответствует выбранным параметрам для данного примера. Частота передачи установлена на значение 87,5 МГц, что является минимальной частотой FM-диапазона, поддерживаемой используемым смартфоном, и при этом свободной от вещания FM-радиостанций.[3]. На рисунке 4 представлена временная реализация сформированного сигнала.

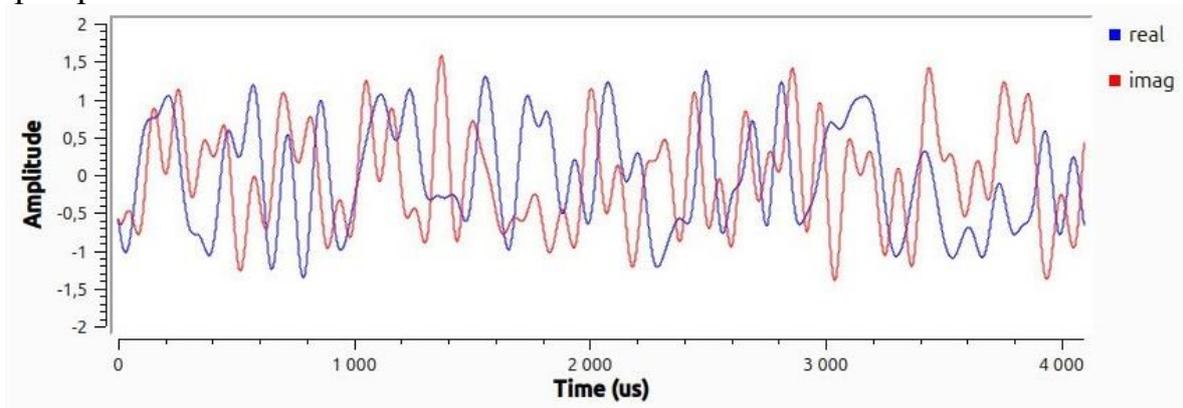


Рис. 4. Временная реализация сигнала в режиме частотной модуляции.

Также можно посмотреть на нормированный спектр полученного сигнала (рис.5.), на котором видно заданные настройки частоты.

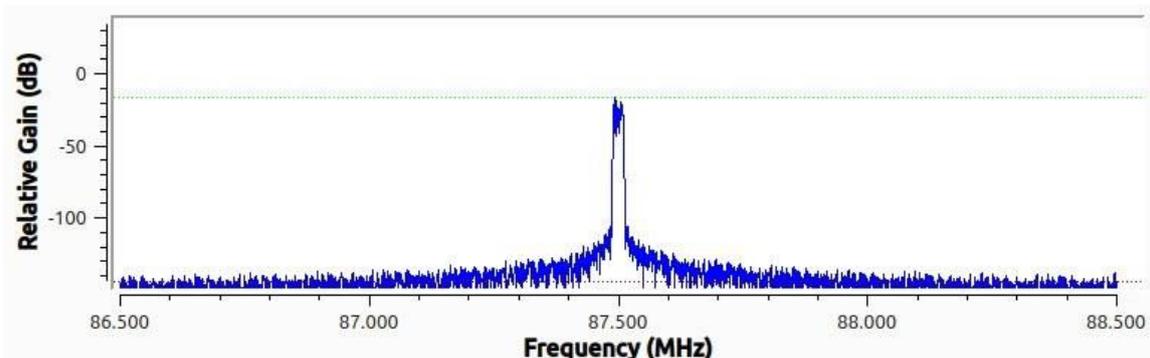


Рис. 5. Нормированный спектр сигнала в режиме частотной модуляции.

Если подвергнуть граф незначительной модификации с целью обеспечения возможности запуска программы в режиме узкополосной частотной модуляции (ЧМ), который применяется в таких устройствах (рис. 6), как радики и радионяни, то можно получить сигнал представленный на рисунке 7.

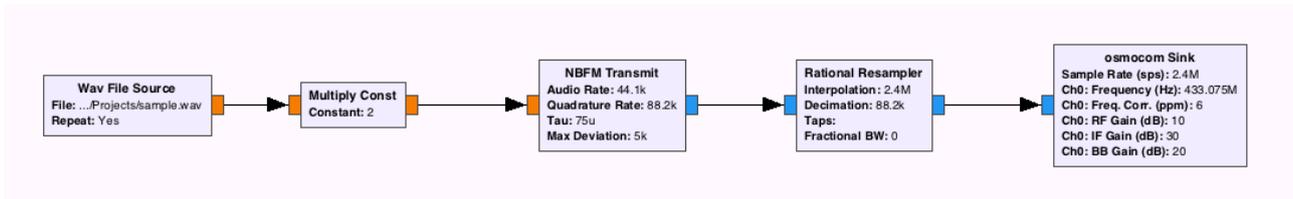


Рис. 6. Граф с изменённым блоком.

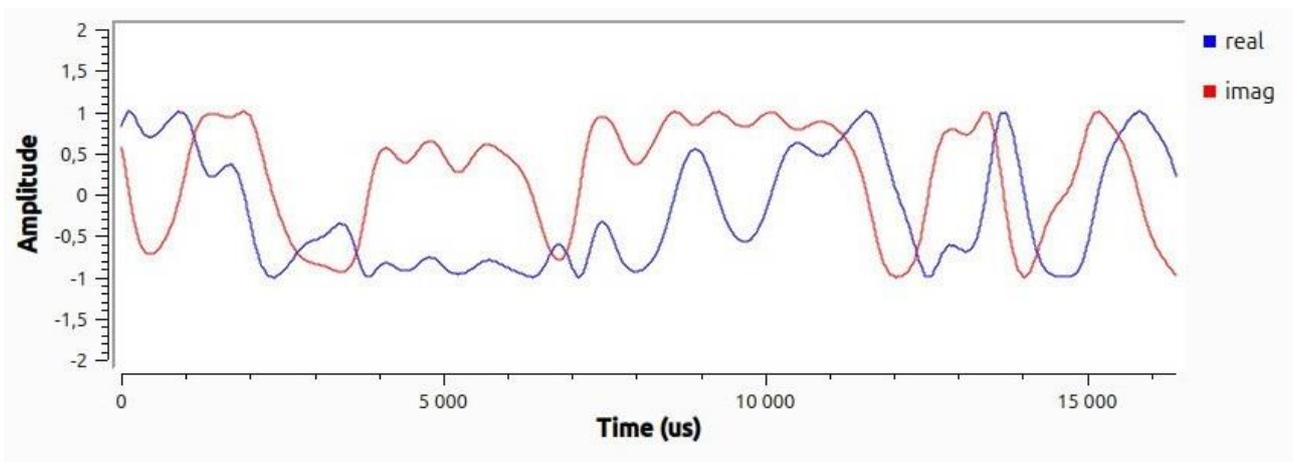


Рис. 7. Временная реализация сигнала в режиме узкополосной частотной модуляции.

Отличие заключается в установке блока NBFM, а частоту передачи установили в 433.075МГц — первый канал LPD-диапазона. Включаем радику, и слышим звук. Стоит отметить, что GNU Radio позволяет использовать в качестве источника не только WAV-файл, но и микрофон, так что программу легко переделать для передачи голосовых сообщений.

С приемником, работающим в КВ-диапазоне можно реализовать режим амплитудной модуляции (АМ). Для этого необходимо создать граф представленный на рисунке 8.

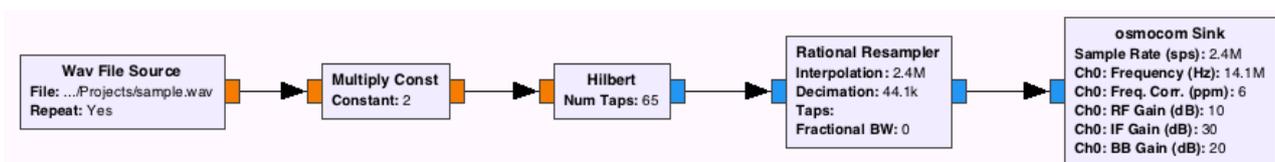


Рис. 8. Граф с амплитудной модуляцией.

Полученный сигнал имеет вид, представленный на рисунке 9.

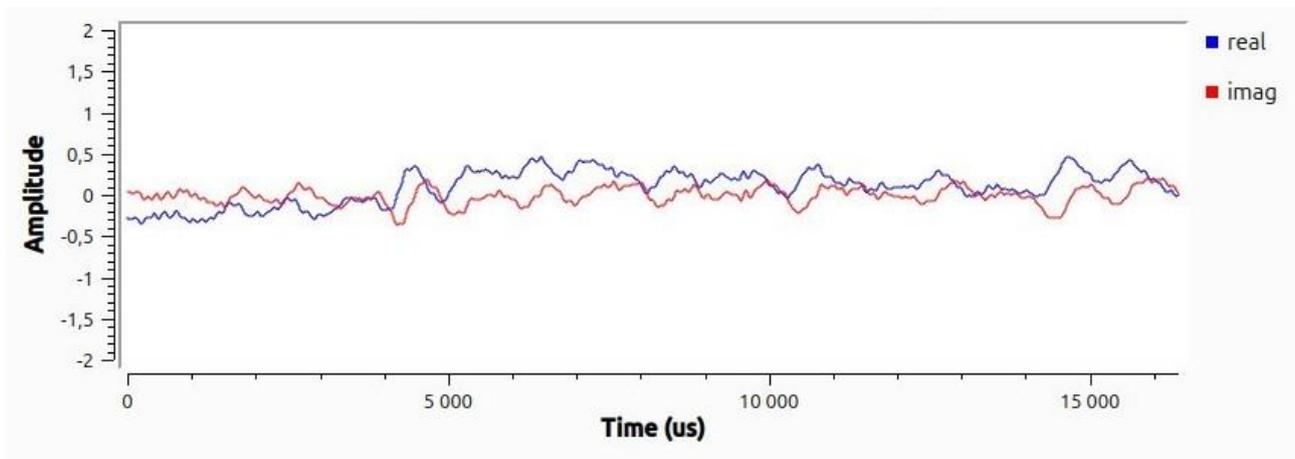


Рис. 9. Временная реализация сигнала в режиме амплитудной модуляции.

В рамках реализации обработки сигналов для преобразования данных в комплексный вид используется блок преобразования Гильберта. Далее сигнал подвергается ресемплингу до требуемой частоты дискретизации и передается в устройство HackRF. Данный подход сохраняет общую структуру обработки сигнала и обеспечивает корректную подготовку данных для дальнейшего использования в программно-определяемом радио.

### Прием радиосигнала

Для принятия FM сигнала используется блок RTL-SDR Source, так же можно использовать osmoscom Source. Для выбора и подстройки центральной частоты был выбран блок QT GUI Range с определенным диапазоном на котором будем осуществляться прием сигналов. Для более точной настройки был использован блок Signal Source с диапазоном от -1 МГц до 1 МГц (рис. 10). Спектры и временные реализации перед фильтром представлены на рисунках 11 и 12 соответственно.

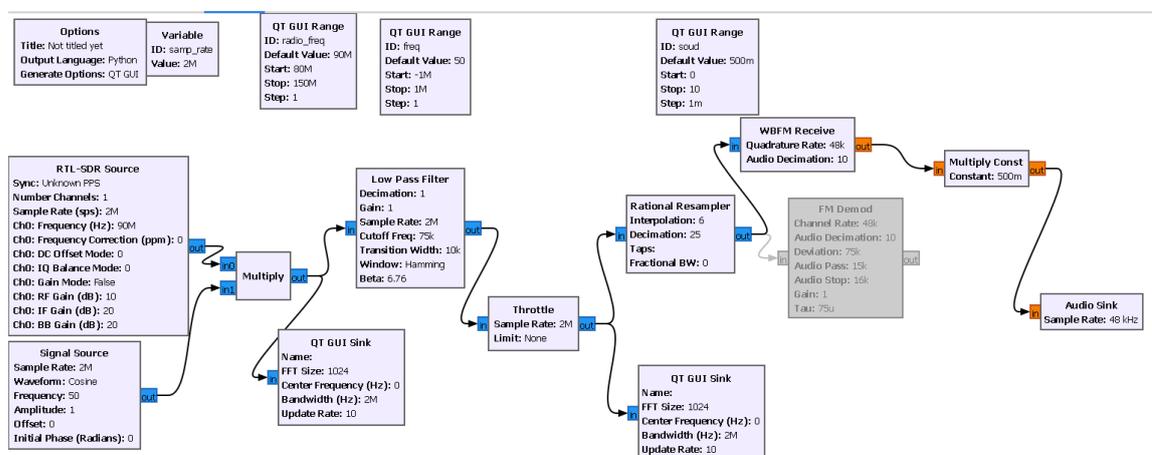


Рис. 10. Реализация простейшего радиоприемника

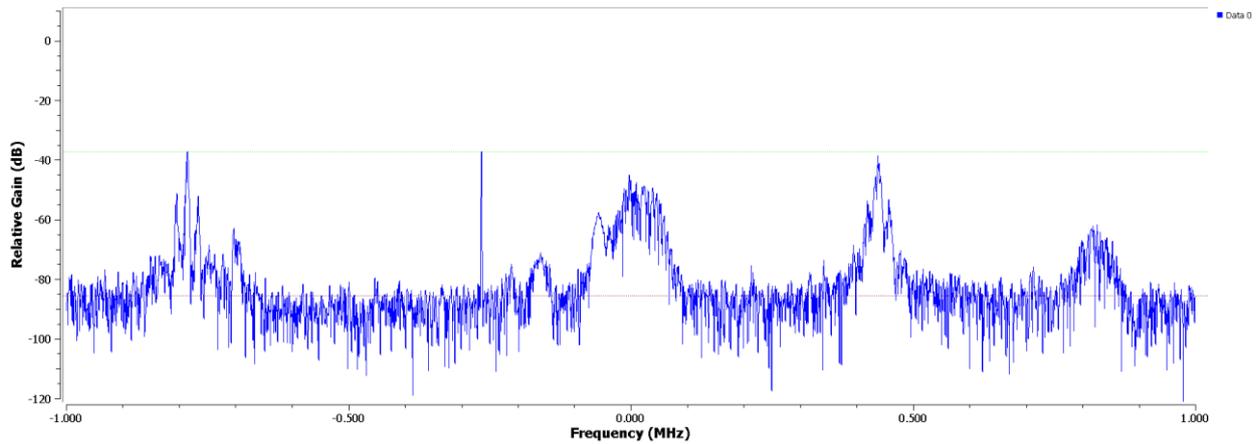


Рис. 11. Спектры сигналов перед фильтром

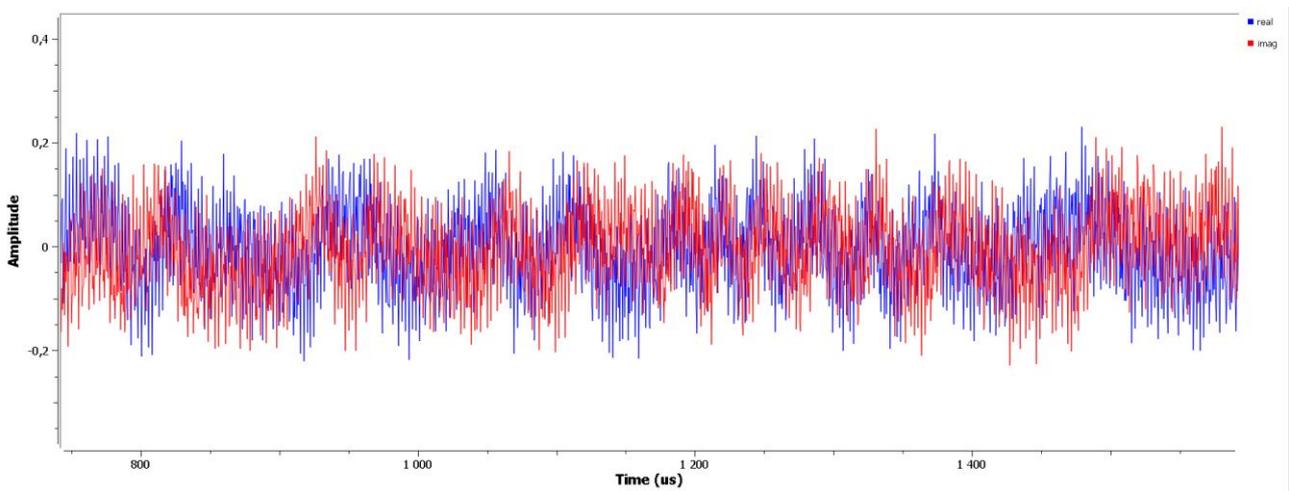


Рис. 12. Временная реализация сигналов перед фильтром

Для удобной обработки сигнала вырежим с помощью фильтра диапазон частот равный 150 кГц. Для уменьшения частоты дискретизации поступающей на демодулятор WBFM Receive используем Rational Resampler чтобы снизить ее до 480 кГц после чего выводим демодулированный сигнал на Audio Sink. Блок Multiply const отвечает за регулировку громкости (рис. 13).

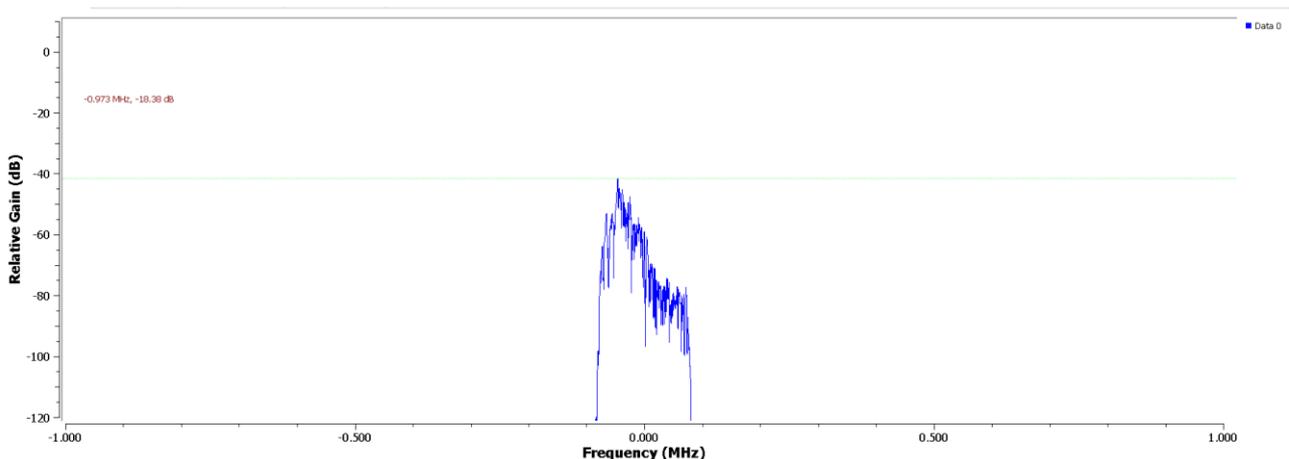


Рис. 13. Спектр выделенного сигнала с помощью фильтра

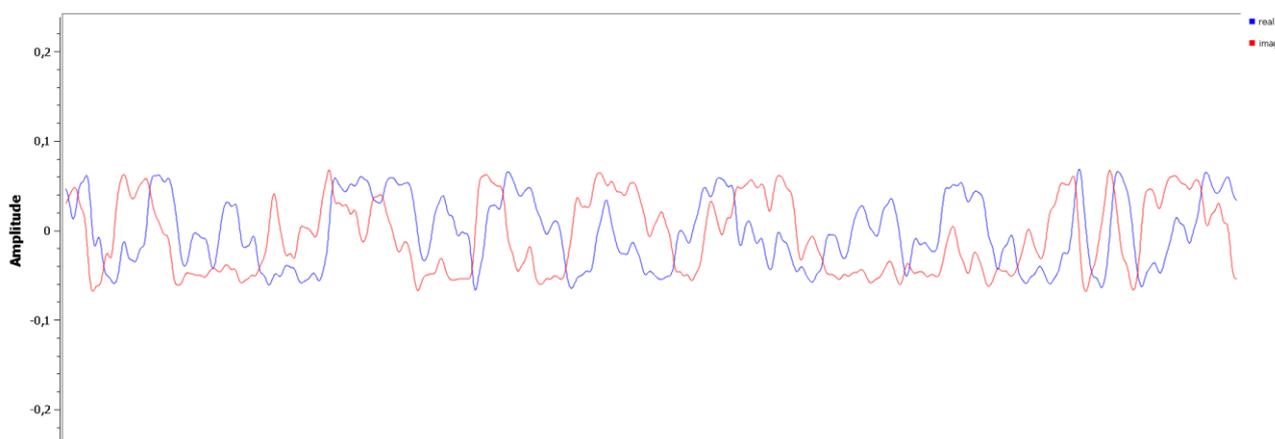


Рис. 14. Временная реализация выделенного сигнала с помощью фильтра

## Реализация автоматического обнаружение и распознавание сигналов в эфире

Для реализации этого был использован Embedded Python Block используемый для создания виртуального приемника с помощью программного кода написанного на языке программирования Python.

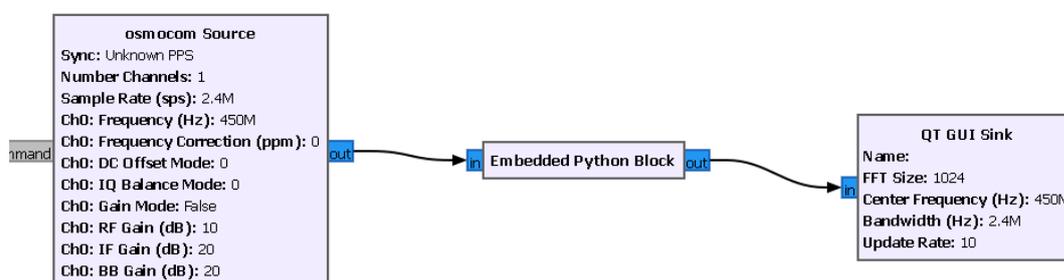


Рис. 15. Схема реализации

Данный программный код позволяет анализировать сигналы в определенном диапазоне частот а именно:

- Анализирует спектр сигнала и находит пиковую частоту.
- Декодирует текст сигнала.
- Определяет тип модуляции(4QAM, BPSK, 8QAM, QPSK, 8PSK).
- Записывает результаты в файл, если сигнал соответствует определённым условиям.

## Заключение

В ходе исследования возможностей программно-определяемого радио HackRF One для работы с сигналами частотной модуляции (ЧМ) были получены значимые результаты, подтверждающие эффективность данного

устройства в задачах анализа и передачи радиочастотных сигналов. HackRF One продемонстрировал свою универсальность, широкий диапазон рабочих частот и гибкость в настройке, что делает его мощным инструментом для исследований в области радиотехники и связи.

В работе также было показано создание виртуального радиоприемника для FM модуляции и 4QAM, BPSK, 8QAM, QPSK, 8PSK модуляций.

### Литература

1. Силин А. Технология Software Defined Radio. Теория, принципы и примеры аппаратных платформ. - 2007: Беспроводные технологии, 22-27 с.
2. Плетнева И.Д. Программно-определяемое радио: лабораторный практикум для подготовки магистров..– 2016, 260-263 с.
3. Шевелёв А.Е., Завьялов С.В. Реализация модема для метеорной радиосвязи на основе SDR платформы HACKRF ONE. - 2016: НЕДЕЛЯ НАУКИ СПбПУ, 79-82 с.
4. Передача радиосигналов с помощью HackRF // Habr URL: <https://habr.com/ru/articles/372177/> (дата обращения: 17.02.2025).