

РАЗРАБОТКА КАНАЛОВ СВЯЗИ С ЦИФРОВОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ В GNU RADIO

Ю. А. Полевода, А. Е. Троицкая, Г. А. Бурень,
Э. А. Рядинская, Г. В. Коняшкин

Статья посвящена созданию каналов связи с различными видами цифровых модуляций. В качестве цифровых модуляций в статье рассматриваются сигналы с QPSK, QAM и PSK. Показано построение канала связи с рассматриваемыми видами цифровых модуляций в программной среде GNU Radio с использованием необходимых блоков и настройкой параметров этих блоков, а также дальнейшая передача сигнала с одного устройства на другое с использованием SDR-технологий. В качестве передатчика сигнала, построенного на базе SDR-технологий, выбрано приемо-передающее устройство HackRF One. Приведены полученные сигнальные созвездия рассматриваемых сигналов с цифровой модуляцией. Проверена работоспособность построенных блок-схем на передачу сигнала с применением программного обеспечения SDR Sharp с подключенным приемным устройством RTL-SDR к персональному компьютеру.

Ключевые слова: цифровая модуляция, канал связи, QPSK-модуляция, PSK, QAM, программно-определяемые радиотехнологии, SDR Sharp, GNU Radio.

Введение

Вопрос точного приема исходного сигнала по различным видам систем передачи информации стоит довольно остро, поскольку в каналах радиосвязи присутствуют не только шумовые помехи, но и нешумовые, излучаемые преднамеренно или непреднамеренно, что при любом исходе влияет на качество принимаемого сигнала. Помимо помехозащищенности сигналов, также стоит вопрос о скорости передачи данных. Для повышения скорости передачи информации используют сигналы с цифровыми модуляциями.

Квадратурно-амплитудная модуляция (QAM) получила широкое применение при создании схем модуляций в различных цифровых телекоммуникационных системах. Чаще всего используется в таких стандартах, как 802.11 Wi-Fi [1]. Спектральная высокоэффективность в QAM достигается путем задания подходящего размера созвездия, ограничениями в котором являются только уровень шума и линейность канала связи. При перемещении к созвездиям большего порядка увеличивается показатель бит/символ, но в этом же случае точки созвездия находятся ближе друг к другу, что влияет на их повышенное восприятие к шуму. Это приводит к более высокой вероятности ошибок в битах. Исходя из этого, самым оптимальным созвездием является QAM-сигнал с позиционностью 16 (16-QAM) [3].

Еще одним способом реализации цифровой модуляции, не чувствительной к помехам, является использование амплитудно-фазовой модуляции (АФМ). При АФМ изменяется как фаза, так и амплитуда сигнала. Это позволяет увеличить количество кодируемых бит, что впоследствии повышает помехоустойчивость. АФМ имеет меньшее

число возможных уровней амплитуды по сравнению с QAM, что дает уменьшение проблем с нелинейными усилителями. АФМ является модуляцией более устойчивой к шумам и фазовым сдвигам в отличие от фазовой модуляции [4].

Квадратурная фазовая модуляция, или QPSK (quadrature phase shift keying или 4-PSK) – четырехуровневая фазовая модуляция, при которой начальная фаза высокочастотного колебания может принимать четыре различных значения с шагом, кратным $\pi/2$ [6]. Данный метод модуляции особенно интересен, так как он в одном символе передает два бита. Если сравнивать бинарную фазовую манипуляцию с квадратурной фазовой манипуляцией, то QPSK-сигналы обеспечивают в два раза большую скорость передачи данных. При квадратурной фазовой манипуляции используется созвездие из четырех точек, которые должны быть размещены на равных расстояниях на окружности. Другими словами, QPSK-символ представляет собой 00, 01, 10 или 11 [5].

Целью работы является создание каналов связи с различными видами цифровых модуляций с применением SDR-технологий для дальнейшего анализа сигналов на помехоустойчивость.

Модели сигналов

На рис. 1 приведены сигнальные созвездия рассматриваемых сигналов (QPSK, 8-PSK, 16-QAM). На созвездиях отмечены сигнальные точки, соответствующие канальным символам. В случае присутствия помехи в канале связи, сигнальные точки смещаются в соседние области, что свидетельствует о наличии ошибки в принимаемом сигнале [2, 6].

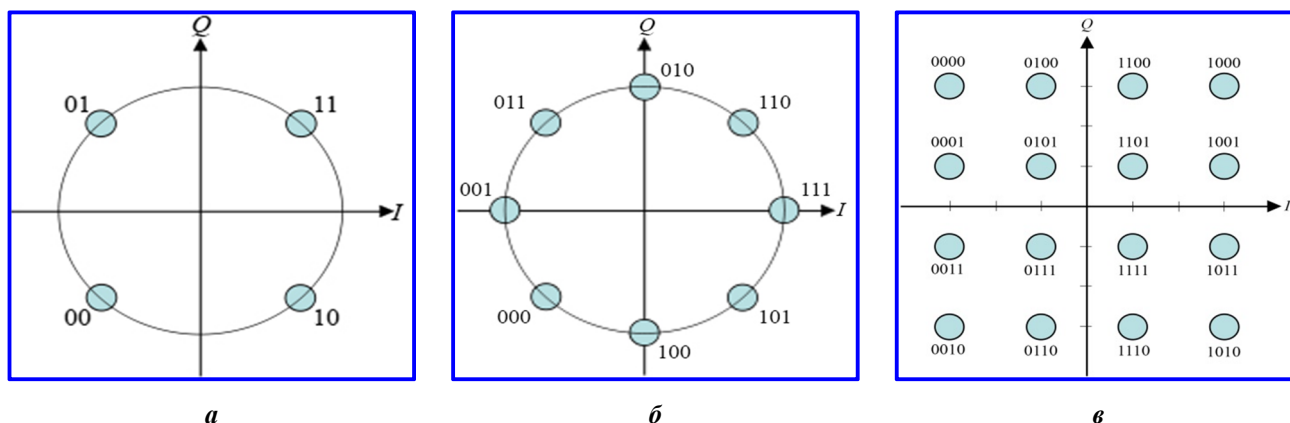


Рис. 1. Сигнальные созвездия рассматриваемых модуляций: а – QPSK; б – 8-PSK; в – 16-QAM

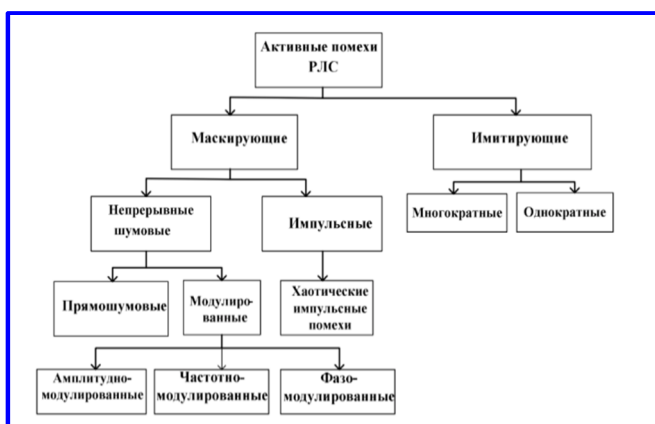


Рис. 2. Классификация активных радиопомех

Виды помех в радиоканалах связи

В любом приемнике сигналов, помимо полезного сигнала, также появляются различные помехи, влияющие на точность и правильность результатов на выходе решающего устройства. В работе рассмотрены некоторые возможные помехи в канале связи. Помехой является воздействие в канале связи на полезный сигнал, которое приводит к искажению исходного сигнала. По виду воздействия на полезный сигнал $s(t)$ помеху можно разделить на аддитивную и мультипликативную [2].

Аддитивной называется помеха $n(t)$, воздействие которой на полезный сигнал не зависит от воздействия помехи. Суммарный сигнал можно записать следующим образом: $x(t) = s(t) + n(t)$.

Для аддитивной помехи характерны следующие свойства:

- равномерная спектральная плотность помехи;
- нормальное распределение мгновенных значений;
- аддитивный способ воздействия на сигнал.

Мультипликативная помеха производит модуляцию полезного сигнала, и сигнал в общем виде можно представить как: $x(t) = a \cdot \mu(t) \cdot s(t)$.

Ложная информация под воздействием мультипликативных помех возникает вследствие изменения параметров самого сигнала.

Бороться с мультипликативными помехами аналогичным образом, как сомнительными, невозможно, поскольку индекс модуляции сохраняется независимо от уровня моделируемого колебания.

Моделирующие помехи влияют на параметры исходного сигнала и характеристики радиотехнических средств, в зависимости от времени обработки сигнала в приемном устройстве и от скорости изменения фазы сигнала и амплитуды сигнала, вызываемых помехами. Если длительность когерентно обрабатываемого сигнала меньше времени корреляции помехи, то изменение амплитуды и фазы сигнала происходит медленней, и в течение исследуемого времени этими изменениями можно пренебречь. В таком случае можно считать форму сигнала практически не искажаемой и воздействия помехи будут ограничиваться изменениями начальной фазы и амплитуды сигнала [2].

Частотно-модулированные помехи относятся к непрерывным помехам, которые являются наиболее универсальными, поскольку обеспечивают принципиальную возможность маскировки полезных сигналов различной формы на временной и частотной осях. Непрерывные помехи используют для подавления сигналов различного назначения. В зависимости от способа формирования помехи, они делятся на модулированные и немодулированные. Модулированные помехи формируются путем модуляции высокочастотных гармонических колебаний низкочастотным шумом по амплитуде, чистоте, фазе или одновременно по нескольким из перечисленных параметров [1]. На рис. 2 приведена классификация активных помех, действующих в канале связи.

Создание передающего сигнала

Для создания передатчика нам понадобится ряд блоков в среде GNU Radio. Первым блоком в создании нашей цифровой модуляции является Random Source (рис. 3). Random Source генерирует несколько сэмплов случайных чисел (min, max), что означает, что максимальное значение не будет включено в заданный диапазон. Доступные типы значений – это int, short или byte. В данном блоке нужно нам поле – это Output Type, значение которого должно быть установлено в byte, min и max должны соответствовать числам 0 и 3. Это необходимо для того, чтобы как можно меньше было помех в точках созвездия. Также есть поле Num Samples, которое подразумевает под собой общее количество выборок, генерирующихся в выходных данных, и Repeat, который указывает повтор сигнала (Yes/No).

Следующим блоком в нашей конфигурации является Throttle (рис. 4). Данный блок нужен, чтобы ограничить скорость, с которой блок Random Source создает выборки. Важно то, что Throttle не управляет скоростью выборки, а ограничивает. Тип данных устанавливаем byte. Значение максимальной средней частоты (Sample Rate) выставляем равным 100 k.

Ключевыми блоками в создании нашей конфигурации будут 2 блока: Constellation Object (рис. 5) и Constellation Modulator (рис. 6). Constellation Object поддерживает создание и использование объектов созвездий. В нем мы задаем тип созвездия QPSK, 8-PSK или 16-QAM соответственно. Constellation Modulator необходим для RRC-фильтрованной дифференциальной комплексной модуляции. На вход блока приходит поток байтов, на выход блока поступает комплексный модулированный сигнал.

Для согласования этих блоков укажем в графе ID блока Constellation Object значение графы Constellation блока Constellation Modulator. Для устранения лишних помех на созвездии значение графы Excess BW выставляем равным 10. Чтобы минимизировать центральную точку, используем значение соотношения Samples/Symbol равное двум.

Для графического вывода сигнала добавляем блок QT GUI Frecuency Sink (рис. 7), отображающий мощность сигнала в зависимости от его частоты, и блок QT GUI Constellation Sink (рис. 8) для отображения созвездия заданного нами сигнала. В графе Bandwidth блока QT GUI Frecuency Sink выставляем значение 32000 Hz.

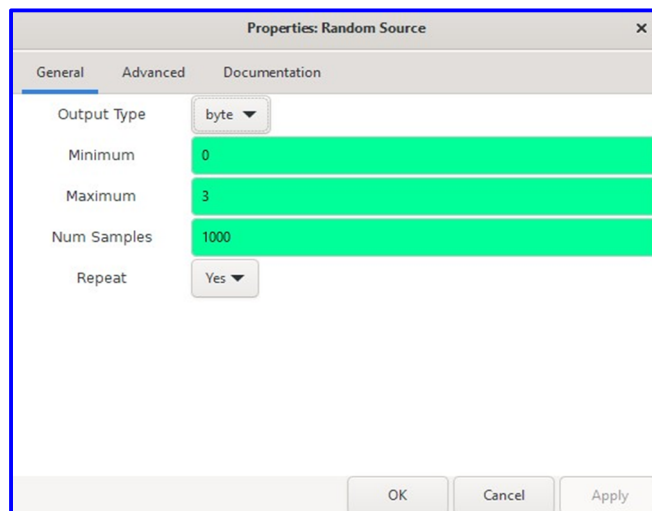


Рис. 3. Параметры блока Random Source

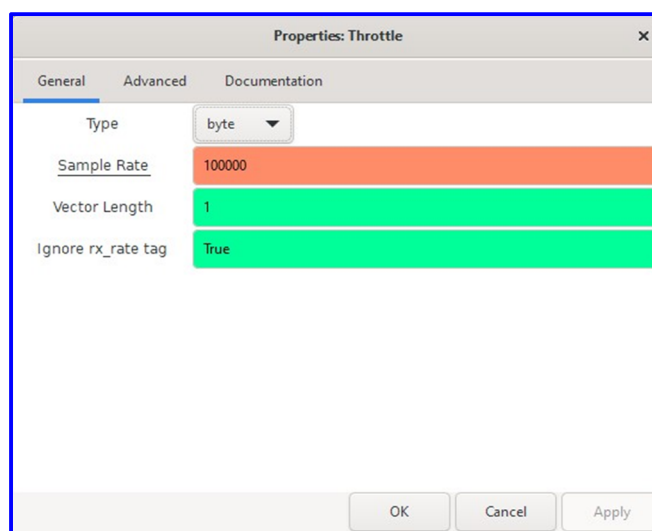


Рис. 4. Параметры блока Throttle

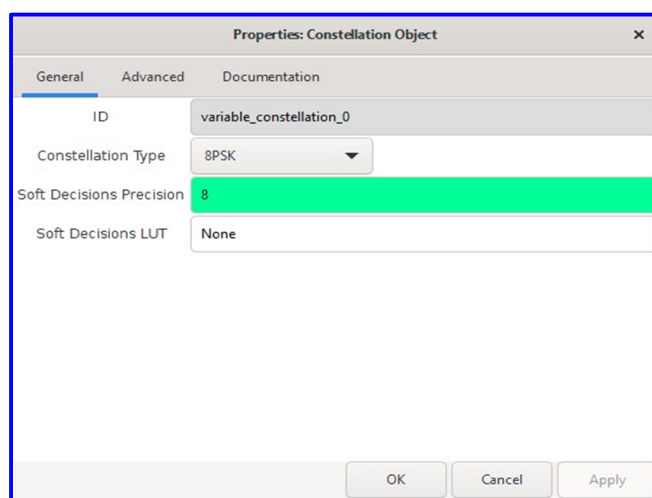


Рис. 5. Параметры блока Constellation Object

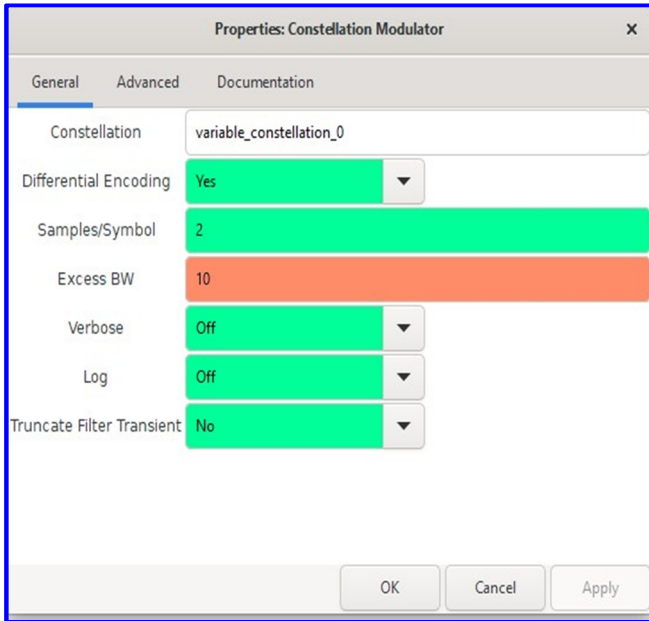


Рис. 6. Параметры блока Constellation Modulator

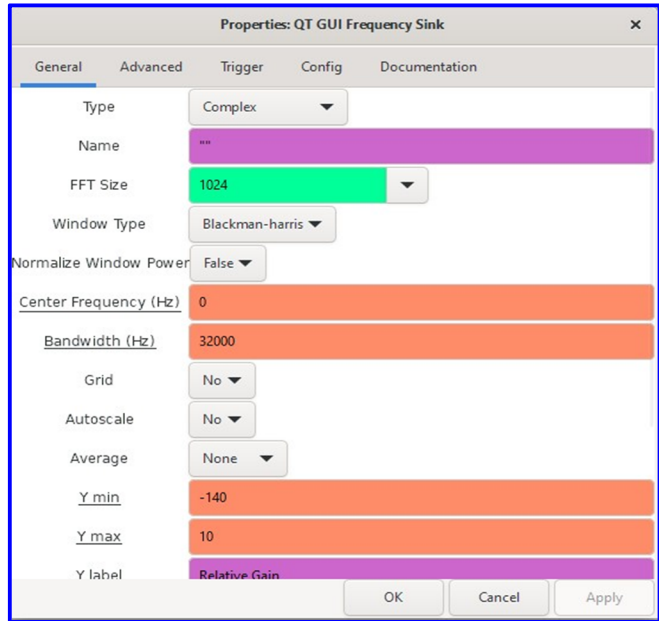


Рис. 7. Параметры блока QT GUI Frequency Sink

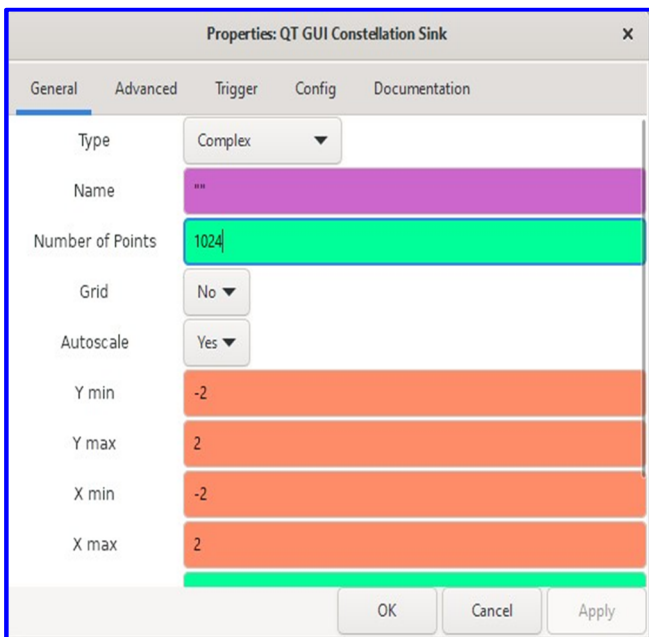


Рис. 8. Параметры блока QT GUI Constellation Sink

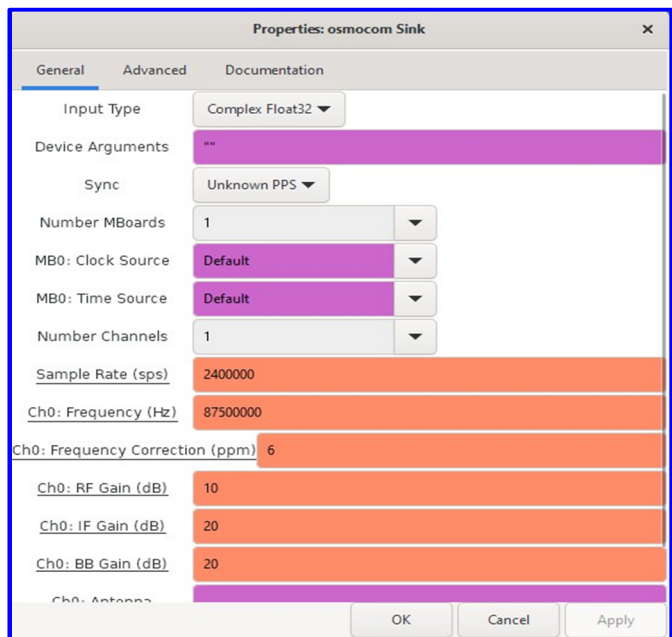


Рис. 9. Параметры блока osmocom Sink

Блок QT GUI Constellation Sink оставляем с теми же параметрами, установленными изначально.

Для передачи сигнала при помощи HackRf One необходимо добавить блок osmocom Sink (рис. 9). Значение Sample Rate устанавливаем равное 2,4 М, а значение Frequency – 87,5 МГц. Коррекцию частоты выставляем равную 6. Для работы данного блока с трансивером нужно установить драйвер SoapyHackRF.

Все добавленные блоки необходимо соединить в одну блок-схему (рис. 10 – 12), которая будет передавать сигнал на другое устройство.

При запуске программы происходит передача сигнала в пространство, построение частотных графиков и построение сигнальных созвездий. Сигнальные созвездия рассматриваемых сигналов приведены на рис. 13 – 15.

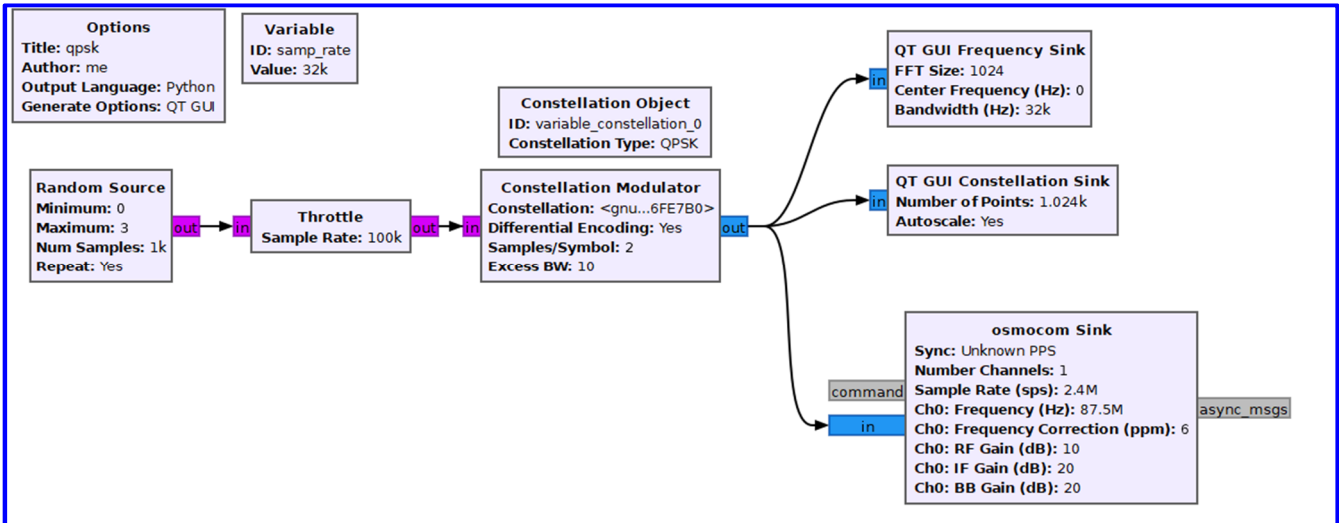


Рис. 10. Блок-схема передатчика с QPSK-модуляцией

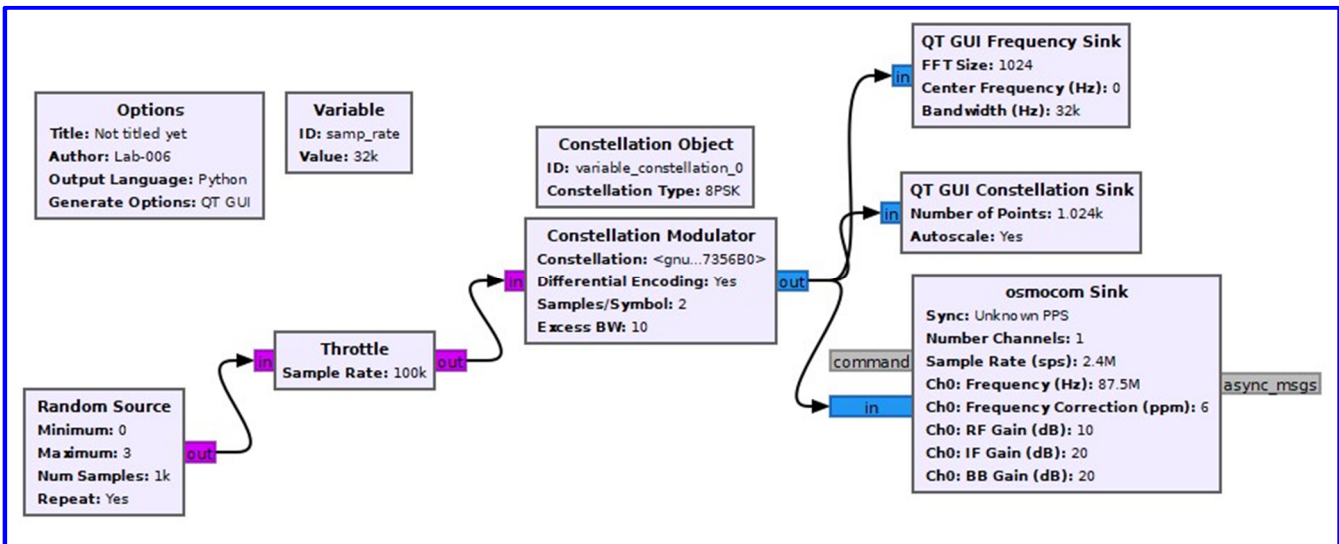


Рис. 11. Блок-схема передатчика с 8-PSK модуляцией

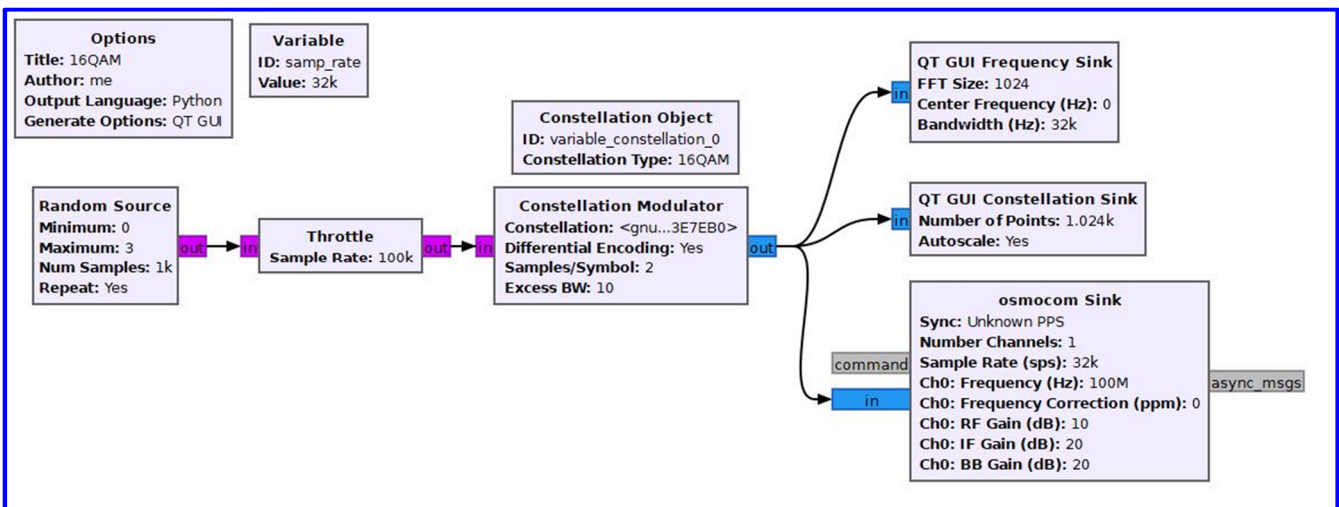


Рис. 12. Блок-схема передатчика с 16-QAM модуляцией

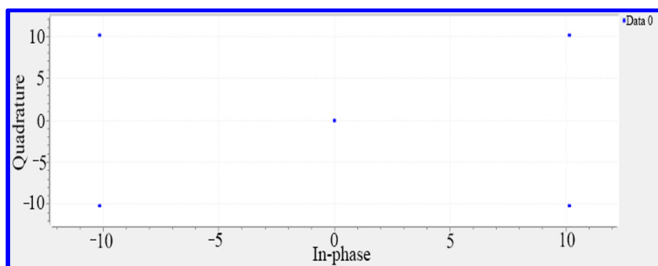


Рис. 13. Сигнальное созвездие QPSK-сигнала

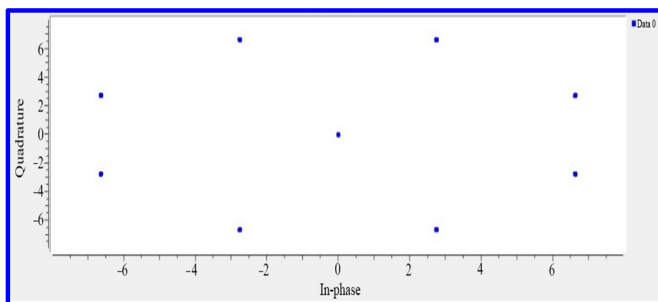


Рис. 14. Сигнальное созвездие 8-PSK-сигнала

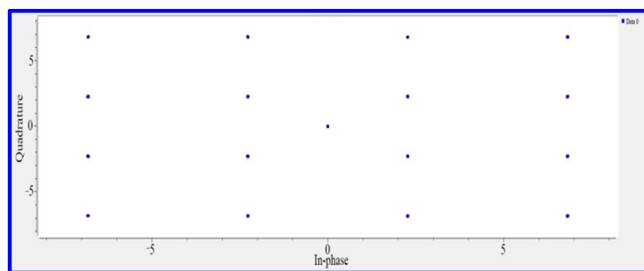


Рис. 15. Сигнальное созвездие 16-QAM-сигнала

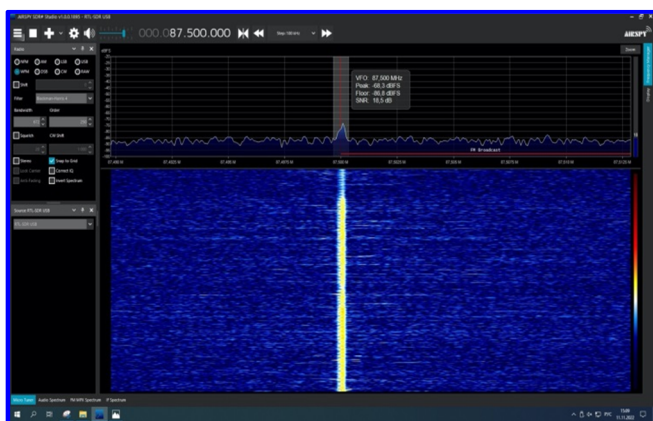


Рис. 16. Спектрограмма принимаемого сигнала и «водопадная» диаграмма

Для проверки того, что блок-схема собрана верно и передает сигнал с минимальными помехами, ко второму компьютеру присоединяется антенна RTL-SDR. При этом необходимо открыть программу

SDRSharp и настроить на частоту 87,5 МГц. При нажатии кнопки запуска в SDRSharp можно наблюдать, что сигнал успешно принимается антенной RTL-SDR. Подтверждение этому – звук принимаемого сигнала, спектрограмма и «водопадная» диаграмма (рис. 16), из которых следует, что в нужной нам области частоты (87,5 МГц) присутствует передаваемый сигнал.

Заключение

В работе рассмотрен метод создания канала связи с различными видами цифровых модуляций в программной среде GNU Radio с передачей сигнала в эфир на заданной частоте, который в дальнейшем можно принимать, добавлять в канал связи различного рода помехи и анализировать приемным устройством. Описаны параметры блоков, необходимых для построения передатчика QPSK-, 8-PSK- и 16-QAM-сигналов. Получены сигнальные созвездия рассматриваемых сигналов, проверена передача сигнала с HackRF One в пространство.

Литература

1. Полевода Ю. А., Куликов Г. В., Самохина Е. В. Определение статистических параметров распределений случайных процессов в корреляционном приемнике сигналов КАМ на фоне ЧМ помехи // Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем («Радиоинфоком – 2021»). Сборник научных статей по материалам V Международной научно-практической конференции. – М.: МИРЭА – Российский технологический университет, 2021. – С. 385 – 389.
2. Куликов Г. В., Нестеров А. В., Лелюх А. А. Помехоустойчивость приема сигналов с квадратурной амплитудной манипуляцией в присутствии гармонической помехи // Журнал радиоэлектроники, 2018. – № 11. – С. 2.
3. Гусев Н. А. Амплитудно-фазовая и квадратурная амплитудная манипуляции в стандартах цифрового телевидения // Actualscience, 2015. – Т. 1. – № 1. – С. 103–104.
4. Куликов Г. В., Нгуен Ван Зунг, Нестеров А. В., Лелюх А. А. Помехоустойчивость приема сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией в присутствии гармонической помехи // Научные технологии, 2018. – № 11. – С. 32 – 38.
5. Нгуен Ван Зунг. Влияние прицельной гармонической помехи на качество приема сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией // XVI Всероссийская молодежная научно-техническая конференция «Радиолокация и связь – перспективные технологии». – М.: МИРЭА – Российский технологический университет, 2018. – С. 31–34.
6. Нгуен Ван Зунг. Влияние прицельной гармонической помехи на качество приема сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией // XVI Всероссийская молодежная научно-техническая конференция «Радиолока-

ция и связь – перспективные технологии». Москва, Мир науки. – С. 45 – 49. Режим доступа: <http://izd-mn.com/PDF/33MNNPK18.pdf>.
6 декабря 2018 г. Материалы конференции. – М.:

Поступила в редакцию 23.08.2022

Юрий Александрович Полевода, аспирант, ассистент кафедры радиоволновых процессов и технологий,
т.: +7(985)299-34-20, e-mail: polevoda@mirea.ru.

Александра Евгеньевна Троицкая, студент группы РИБО-03-19.

Глеб Андреевич Бурень, студент группы РИБО-03-19.

Эльза Алексеевна Рядинская, студент группы РИБО-03-19.

Георгий Викторович Коняшкин, магистрант, заведующий лабораторией
кафедры радиоволновых процессов и технологий,

т.: +7 (901) 744-29-87, e-mail: konyashkin@mirea.ru.

(МИРЭА – Российский технологический университет).

DEVELOPMENT OF COMMUNICATION CHANNELS WITH DIGITAL MODULATION IN GNU RADIO

**Yu. A. Polevoda, A. E. Troitskaya, G. A. Buren,
E. A. Ryadinskaya, G. V. Konyashkin**

The article is devoted to the creation of communication channels with different types of digital modulations. As digital modulations in the article signals with QPSK, KAM and AFM are considered. Considered the construction of the communication channel with the considered types of digital modulations in the software environment GNU Radio with the use of necessary blocks and setting parameters of these blocks, as well as the further transmission of the signal from one device to another using SDR-technology. As a signal transmitter, built on the basis of SDR-technology, selected receiving and transmitting device HackRF One. Received signal constellations of the signals under consideration with digital modulation are given. The workability of the constructed block diagrams for signal transmission using SDR Sharp software, with the RTL-SDR receiving device connected to a personal computer has been checked.

Keywords: digital modulation, channel, QPSK-modulation, PSK, QAM, software-defined radio technology, SDR Sharp, GNU Radio.

References

1. Polevoda Yu. A., Kulikov G. V., Samokhina E. V. Determination of statistic parameters of distributions of random processes in a correlation-type QAM signal receiver in presence of FM noise // Critical issues and prospects for development of radio and information & communications systems ('Radioinfocom – 2021'). Collection of scientific articles based on proceedings of Vth International Research and Practical Conference. – M. : MIREA – Russian Technological University, 2021. – Pp. 385 – 389.
2. Kulikov G. V., Nesterov A. V., Lelyukh A. A. Noise-resistant reception of QAM signals in presence of harmonic interference // Journal of Radio Electronics, 2018. – No. 11. – P. 2.
3. Gusev N. A. Amplitude-phase and quadrature amplitude shift keying in digital television standards // Actualscience, 2015. – V. 1. – No. 1. – Pp. 103 – 104.
4. Kulikov G. V., Nguyen Van Zung, Nesterov A. V., Lelyukh A. A. Noise-resistant reception of multi-phase shift keying signals in presence of harmonic interference // High technologies, 2018. – No. 11. – Pp. 32 – 38.
5. Nguyen Van Zung. Influence of selective harmonic interference on quality of reception of MPSK signals // XVIth All-Russia Scientific and Technical Youth Conference 'Radiolocation and Communications – Advanced Technologies'. – M. : MIREA – Russian Technological University, 2018. – Pp. 31 – 34.
6. Nguyen Van Zung. Influence of selective harmonic interference on quality of reception of MPSK signals // XVIth All-Russia Scientific and Technical Youth Conference 'Radiolocation and Communications – Advanced Technologies'. Moscow, December 6, 2018. Conference proceedings. – M. : Publishing company 'World of science'. – Pp. 45 – 49. – Access available at: <http://izd-mn.com/PDF/33MNNPK18.pdf>.

Yuri Alexandrovich Polevoda, postgraduate student, assistant of the Department of Radio Wave Processes and Technologies of the Institute of Radioelectronics and Informatics of RTU MIREA,
tel.: +7 (985) 299-34-20, e-mail: polevoda@mirea.ru.

Alexandra Evgenievna Troitskaya, RIBO-03-19 student from the Institute of Radioelectronics and Informatics of the Moscow Institute of Radioelectronics and Informatics.

Gleb Andreevich Buren, RIBO-03-19 student from the Institute of Radioelectronics and Informatics

Elsa Alexeyevna Ryadinskaya, RIBO-03-19 student from the Institute of Radioelectronics and Informatics of the Moscow Institute of Radioelectronics and Informatics.

Georgy Viktorovich Konyashkin, Master's student of RTU MIREA, Head of Laboratory, Department of Radio Wave Processes and Technologies, Institute of Radioelectronics and Informatics, RTU MIREA, tel.: +7 (901) 744-29-87, e-mail: konyashkin@mirea.ru. (MIREA – Russian Technological University).