

Аппаратно-программный комплекс для исследования влияния помех с различной структурой на приёмник сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией

И. Н. Сиротин, Е. В. Бочаров, Н. В. Швагерус
Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского
vka@mil.ru

Аннотация. В данной работе будет рассмотрен аппаратно-программный комплекс для передачи и приёма сигналов с фазовой манипуляцией, созданный с помощью программной среды GNURadio и SDR приёмника HackRF, а также будет исследовано влияние различных видов помех на приемное устройство.

Ключевые слова: SDR Hack RF; GNU Radio; канал связи; фазовая манипуляция; помехи

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время информация по сетям радиосвязи передается в основном в цифровом виде. Объемы передаваемой информации постоянно возрастают. Для передачи цифровой информации применяются цифровые виды модуляции (манипуляции): амплитудная, частотная, фазовая (ФМн) и амплитудно-фазовая.

Для приема и передачи цифровой информации широко используются SDR технология, которая подразумевает настройку рабочих радиочастотных параметров передающей и приемной части с помощью программного обеспечения.

Для исследования влияния помех с различной структурой спектра на приёмник сигналов с различными видами цифровой модуляции (манипуляции) необходимо разработать аппаратно-программный комплекс (АПК), который позволит исследовать действие помех с различной структурой на качество передачи информации.

Анализ публикаций [1, 2, 3, 4], посвящённых исследованию воздействия непреднамеренных помех различной структуры на приёмники сигналов с различными видами модуляции показал, что одним из помехоустойчивых видов модуляции сигналов является фазовая манипуляция. Поэтому в данной работе основное внимание уделяется разработке АПК, реализованного с применением SDR технологии, который обеспечивает передачу и прием сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией.

II. СТРУКТУРА И ПРИНЦИП РАБОТЫ АПК

Внешний вид разработанного АПК представлен на рис. 1.



Рис. 1. АПК для исследования влияния непреднамеренных помех на приёмник сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией

Аппаратно-программный комплекс состоит:

- передающая и приемная части, состоящие каждая из ПЭВМ с программным обеспечением (ПО) GNU Radio, с подключенным SDR-трансивером «Hack RF One»;
- анализатор спектра для контроля параметров формируемых сигналов и помех;
- генератор сигналов, который используется для формирования помех с различной структурой спектра (регулярной, нерегулярной и смешанной) [3].

А. Описание передающей части АПК

Передающая часть АПК обеспечивает формирование высокочастотного сигнала, который модулирован информационным сообщением. Информационное сообщение представляет собой заданную последовательность «0» и «1», которую легко наблюдать при демодуляции в приемной части АПК.

Для формирования сигналов используется программный модуль передающей части АПК (ПМ ПРД АПК) разработанный в ПО Gnu Radio, структура которого

приведена на рис. 2. Основными блоками в данном модуле являются: «Vector Source», «Scrambler», «Constellation Modulator», «Osmocom Sink», «Qt GUI Sink».

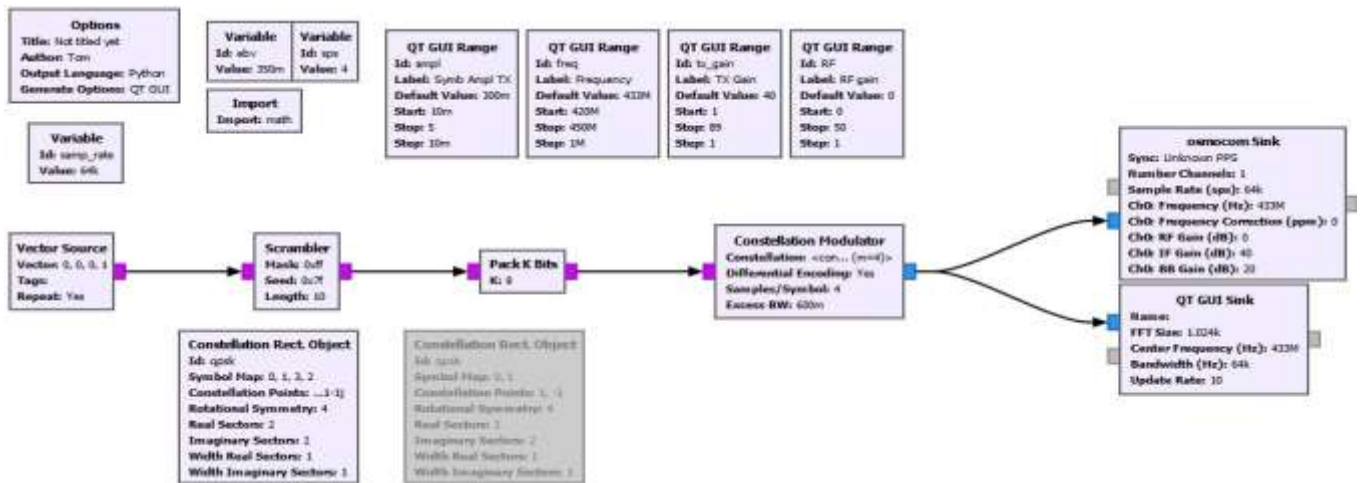


Рис. 2. Программная реализация передающей части для ФМн сигналов

Блок «Vector Source» ПМ ПРД АПК обеспечивает генерацию информационного сообщения. Входным параметром блока является заданная последовательность символов (рис. 3).

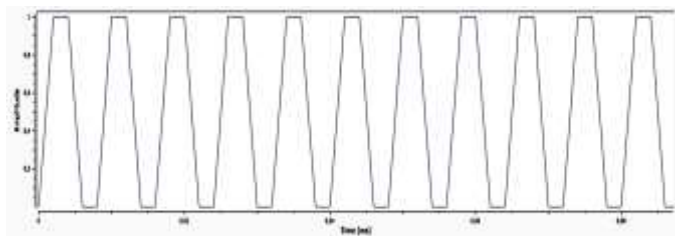


Рис. 3. Сигнал на выходе источника «Vector Source»

После генерации сообщение поступает во второй блок «Scrambler» (скремблер), предназначенный для преобразования заданного цифрового потока данных по алгоритму LFSR (Linear feedback shift register – регистр сдвига с линейной обратной связью).

Далее цифровой поток данных поступает в блок «Constellation Modulator» (модулятор). Закон модуляции в нём задается блоком «Constellation Object», который присваивает символам значения на фазовом созвездии, в зависимости от числа позиций ФМн.

Блок «Osmocom Sink» предназначен для передачи сигнала с помощью SDR-трансивера «Hack RF One», а блок «Qt GUI Sink» для графической визуализации спектра сигнала.

Для передачи радиосигналов используется аппаратный модуль передающей части АПК на базе SDR-трансивера «Hack RF One». Приведенный трансивер позволяет формировать сигналы в диапазоне частот до 6 ГГц.

Передача информации через трансивер осуществляется пакетами для синхронизации работы передающей и приемной части АПК. АПК обеспечивает формирование сигналов с различным количеством вариантов позиций ФМн (ФМн-2, ФМн-4). Математически фазоманипулированный сигнал может быть записан в следующем виде [2]:

$$S(t) = U_0 \cos(\omega_0 t + \theta_i(t) + \theta_0), \text{ где } \theta_i(t) = i \frac{2\pi}{M}, \quad (1)$$

где U_0 – амплитуда; ω_0 – несущая частота; $\theta_i(t)$ – информационная фаза, может принимать M дискретных значений, θ_0 – начальная фаза; Значения, которые принимает фаза ФМн-сигнала при различных значениях информационного сигнала $I(t)$, приведены в таблице.

ТАБЛИЦА 1 ЗНАЧЕНИЯ ФАЗЫ ДЛЯ ФМн СИГНАЛОВ

Для $M = 2$ (ФМн-2)	Для $M = 4$ (ФМн-4)
$\theta_i(t) = \begin{cases} \pi, & I(t) = 0 \\ 0, & I(t) = 1 \end{cases}$	$\theta_i(t) = \begin{cases} \frac{\pi}{4}, & I(t) = 00 \\ \frac{3\pi}{4}, & I(t) = 01 \\ \frac{5\pi}{4}, & I(t) = 10 \\ \frac{7\pi}{4}, & I(t) = 11 \end{cases}$

В. Приемная часть АПК

Приёмная часть АПК обеспечивает приём входной реализации радиосигнала и помехи, выделение информационного сигнала из принятой смеси и его обработку с целью извлечения информационной составляющей.

Для обработки сигналов используется программный модуль приёмной части АПК (ПМ ПРМ АПК) разработанный в ПО Gnu Radio, структура которого приведена на рис. 4. Основными блоками в данном модуле являются: «Osmocom Source», «LMS DD Equalizer», «Costas Loop», «Constellation Decoder», «Differential Decoder», «Map», «Unpack K Bits», «Descrambler», «QT GUI Time Sink».

Первый блок «Osmocom Source» предназначен приёма сигнала с помощью SDR-трансивера «Hack RF One» в заданном частотном диапазоне.

Блок «LMS DD Equalizer» в совокупности с блоком «Costas Loop» позволяют избавиться от эффекта многолучевого приёма, а также эффектов смещения фазы и частоты.

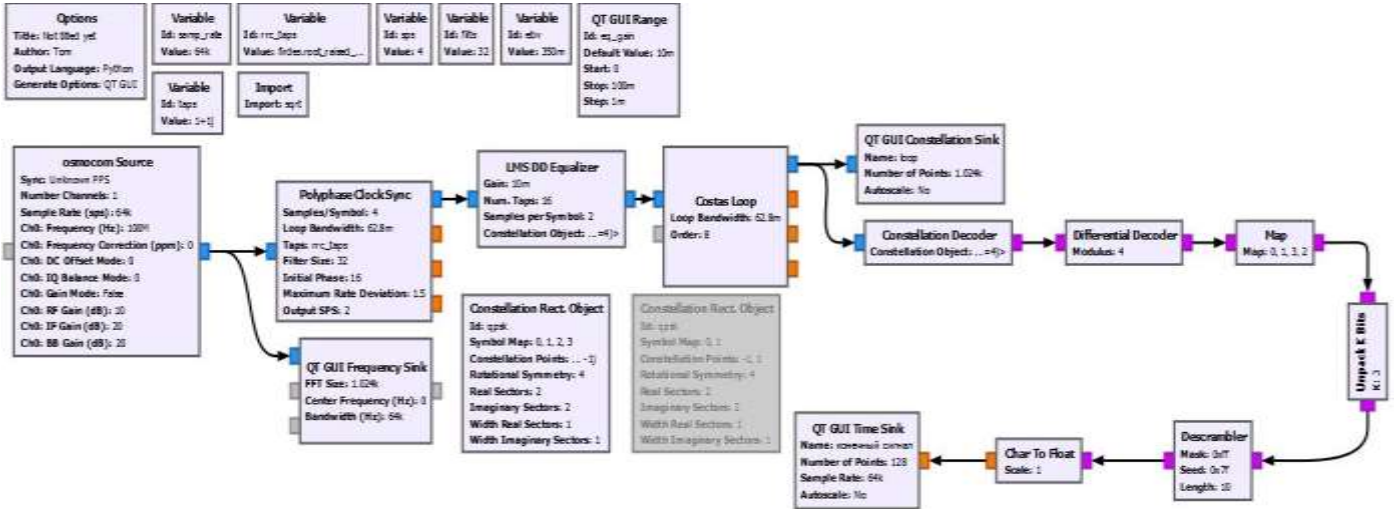


Рис. 4. Программная реализация приёмной части для ФМ сигналов

После обработки сигнала в вышеописанных блоках, он декодируется при помощи блоков «Constellation Decoder», который позволяет раскодировать символы с точек созвездия, и «Differential Decoder», который используется для преобразования кодированных дифференциальным кодом символов обратно в их исходные символы из-за фазовых переходов, а не самой абсолютной фазы. После необходимо правильно интерпретировать закодированные на передающей стороне символы на точки созвездия, что осуществляется посредством использования блока «Map».

В дальнейшем в ПМ ПРМ выполняются операции обратные тем, что выполнялись в ПМ ПРД: распаковка пакетов битов «Unpack K Bits», дескремблирование (блок «Descrambler»). Блок «QT GUI Time Sink» визуализирует полученный информационный сигнал.

С. Генератор помех и анализатор спектра

Генератор обеспечивает формирование помех типа: немодулированная несущая в виде гармонического колебания (НН), несущая с амплитудной модуляцией низкочастотным шумом (АМШ), несущая с частотной модуляцией низкочастотным шумом (ЧМШ).

Анализатор спектра обеспечивает контроль работы радиоканала, контроль параметров радиосигнала и формируемой помехи.

III. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОЗДЕЙСТВИЯ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ПОМЕХ НА ПРИЁМНИК СИГНАЛОВ С МНОГОПОЗИЦИОННОЙ ФАЗОВОЙ МАНИПУЛЯЦИЕЙ

Для оценки эффективности воздействия различных видов помех на приёмник применяется коэффициент подавления.

Под коэффициентом подавления (K_n) понимается минимальное необходимое отношение средней мощности помехи (P_n) к средней мощности сигнала (P_c) на входе приёмника, при котором приёмник не способен выполнять своё функциональное предназначение [8]. Расчёт K_n производится по формуле:

$$K_n = \left(\frac{P_n}{P_c} \right)_{\min(\text{вх. прм.})} \quad (2)$$

Для того, чтобы найти минимальные значения уровней помех, которые будут ограничивать работу ПРМ АПК проводилось исследование зависимости K_n от расстройки частоты помехи (Δf) и сигнала для трёх приведенных выше видов помех (НН, АМШ, ЧМШ). Сигналы на выходе приёмника при воздействии помех представлены на рис. 5.

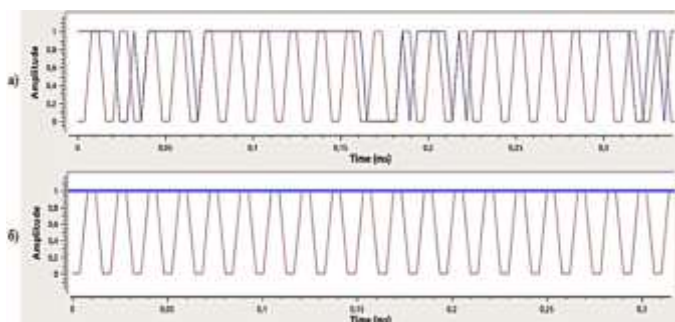


Рис. 5. Графики сигнала на выходе приёмного устройства при воздействии помех: а) приём с ошибками; б) полное подвалиние

Полученные данные с целью наглядности были оформлены в виде графиков, представленных на рис. 6.

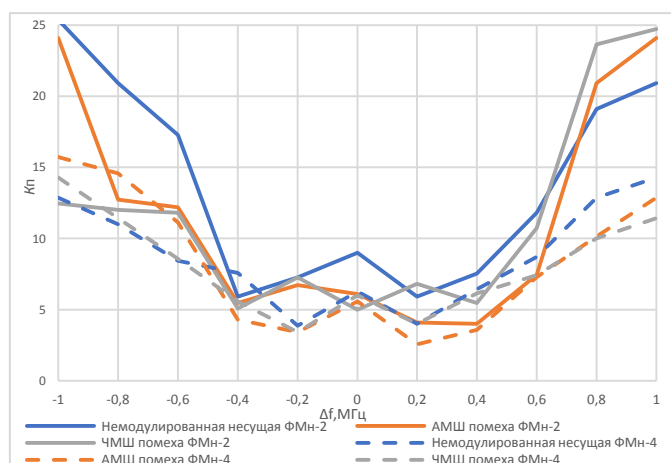


Рис. 6. График зависимости K_n от расстройки частоты

Анализ графиков, приведенных на рис. 6 показал, что более помехоустойчивым видом модуляции является ФМн-2, так как среднее значение коэффициента подавления (\bar{K}_n) для каждого из рассмотренных видов помех (для ЧМШ 11,36, для АМШ 11,62 и для НН 13,82) больше, чем с ФМн-4 (для ЧМШ $\bar{K}_n = 8,03$, для АМШ $\bar{K}_n = 8,29$ и для НН $\bar{K}_n = 8,75$).

Выводы по ПУ соответствуют теории [7], что подтверждает правильность работы разработанного АПК.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, разработанный АПК позволяет осуществить передачу радиосигнала от источника информации до конечного получателя используя пару

SDR-трансивер «Hack RF One» и ПЭВМ с установленным ПО «GNU Radio».

Проведенные исследования показали, что существует возможность визуально контролировать правильность передачи информационных бит после обработки радиосигнала в ПМ ПРМ АПК.

Необходимо отметить, что разработанный АПК является универсальным с точки зрения выбора вида модуляции сигналов и может использоваться при проведении практических занятий в учебном процессе. Изменение вида модуляции осуществляется программно и не требует доработок комплекса.

В перспективе в АПК предполагается расширить функционал для обеспечения наглядной передачи фрагментов текста или графических файлов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Бучинский Д.И., Вознюк В.В., Фомин А.В. Исследование помехоустойчивости приемника сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией к воздействию помех с различной структурой // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2019. Вып. 671. С. 120–123.
- [2] Фокин Г.А. Принципы и технологии цифровой связи на основе программноконфигурируемого радио: обзор современных тенденций в области создания комплекса // Труды учебных заведений связи 2019. т. 5. № 1 С. 78–94.
- [3] Петров А.В. Помехоустойчивость приема сигналов с двоичной фазовой манипуляцией при воздействии хаотической импульсной помехи со случайной длительностью и фазой радиопульса // Радиотехника. 2018. № 8. С. 28–33.
- [4] Вознюк В.В., Фомин А.В. Оценка качества преднамеренных помех цифровым системам передачи информации методом компьютерного моделирования // Труды Военнокосмической академии имени А.Ф. Можайского. 2015. Вып. 645. С. 79–87.
- [5] Аппаратурный анализ сигналов: учебное пособие / И.Н. Сиротин, А.В. Паршуткин, Д.В. Левин. СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2021. 224 с.
- [6] Компьютерное моделирование процессов радиоэлектронной борьбы: учеб. пособие / В.В. Вознюк, А.А. Гусаров, С.А. Зайцев и др.; под ред. В.В. Вознюка. СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2011. Ч. 1: Моделирование радиотехнических и информационных процессов. 186 с.
- [7] Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / пер. с англ. Изд. 2-е, испр. М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. 1104 с.
- [8] Теоретические основы радиоэлектронной борьбы. Ч. 1. Радиоэлектронной поражение радиоэлектронных средств: учебное пособие / А.В. Паршуткин, А.А. Гусаров, В.М. Баранов и др.; под общ. ред. В.В. Вознюка. СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2013. 526 с.