

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ДИСКРЕТНОЙ МОДУЛЯЦИИ ДЛЯ СИСТЕМ ЗАЩИЩЕННОЙ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

Дейкало И.С., студент гр.461402

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Фильченкова Т.М. – старший преподаватель каф. ЗИ

Аннотация. В работе проведено исследование эффективности различных видов дискретной модуляции для применения в системах защищенной передачи данных. Рассмотрены двоичная фазовая, квадратурная фазовая и частотная манипуляции. С использованием языка Python выполнено моделирование прохождения сигналов через канал с аддитивным гауссовским шумом, рассчитаны вероятности битовой ошибки и спектральная эффективность. На основе полученных данных предложены рекомендации по выбору метода дискретной модуляции для систем защищенной передачи данных.

Ключевые слова. Дискретная модуляция, манипуляция, канал связи, помехоустойчивость, спектральная эффективность, двоичная фазовая манипуляция, квадратурная фазовая манипуляция, частотная манипуляция.

Надежность канала связи в защищённых системах передачи данных в значительной степени зависит от параметров физического уровня передачи даже с учетом развитых средств защиты информации. Качество передачи определяется тем, как сигнал сохраняет свою целостность и разборчивость в условиях шума и воздействия помех. Поэтому при проектировании защищённых систем передачи данных следует уделять внимание параметрам физического уровня передачи.

Определяющим элементом физического уровня является метод дискретной модуляции. Причем выбор способа представления цифровой информации в виде параметров несущего сигнала определяет спектральную эффективность системы, а также ее помехоустойчивость.

Для исследования эффективности дискретной модуляции в системах защищённой передачи данных были выбраны следующие методы: двоичная фазовая, квадратурная фазовая и частотная манипуляции. Данные виды обеспечивают высокую помехоустойчивость и стабильность передачи информации. ФМн-2 и ФМн-4 позволяют наглядно изучить влияние числа фазовых состояний на надёжность сигнала, а ЧМн исследовать устойчивость к амплитудным помехам.

Для проверки их работы и дальнейшего анализа сигналы с ФМн-2, ФМн-4 и ЧМн были смоделированы с использованием языка Python и библиотек NumPy и Matplotlib. Далее был создан канал связи с аддитивной гауссовской помехой, описываемый формулой [1]:

$$r(t) = s(t) + n(t), \quad (1)$$

где $r(t)$ – сигнал на выходе канала, $s(t)$ – передаваемый сигнал, $n(t)$ – гауссовский шум.

После прохождения сигнала через канал связи была выполнена его демодуляция. Демодулятор для каждого битового интервала вычислял среднее значение и принимал решение о переданном бите. Затем восстановленная последовательность сравнивалась с исходной, и по числу несовпадений определялась вероятность битовой ошибки.

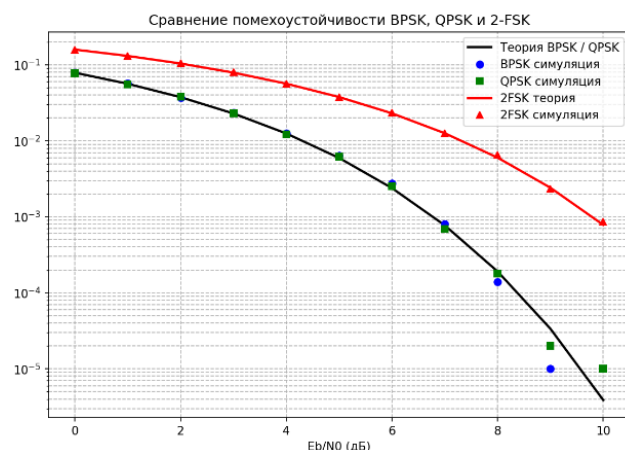
Для верификации результатов моделирования были рассчитаны теоретические кривые помехоустойчивости, которые описывают зависимость вероятности битовой ошибки от отношения E_b/N_0 . Для систем с двоичной и квадратурной фазовой манипуляцией теоретическая вероятность битовой ошибки определяется выражением [2]:

$$P = Q\left(\sqrt{\frac{2E}{N}}\right). \quad (2)$$

Для системы с двоичной частотной манипуляцией вероятность битовой ошибки рассчитывается по формуле:

$$P = Q\left(\sqrt{\frac{E}{N}}\right). \quad (3)$$

Результаты моделирования и теоретических расчетов представлены на рисунке 1.

Рисунок 1 – Зависимость вероятности битовой ошибки от отношения E_b/N_0

Основываясь на полученных данных, более помехоустойчивы сигналы с ФМн-2 и ФМн-4, чем сигналы с ЧМн. В среднем проигрыш частотной манипуляции составляет 3 дБ. Это означает, что для обеспечения того же качества связи при использовании частотной манипуляции потребуется передатчик в два раза мощнее, чем при использовании ФМн-2 или ФМн-4.

Однако при выборе метода манипуляции важным параметром является не только помехоустойчивость, но и эффективность использования частотного ресурса канала связи. В современных системах передачи данных спектр является ограниченным ресурсом, поэтому необходимо стремиться к максимально эффективному использованию занимаемой полосы частот. Для оценки данного свойства используется показатель спектральной эффективности, характеризующий количество передаваемой информации на единицу полосы частот.

Чтобы определить спектральную эффективность исследуемых сигналов, строится график спектральной плотности мощности для каждого вида модуляции (рисунок 2).

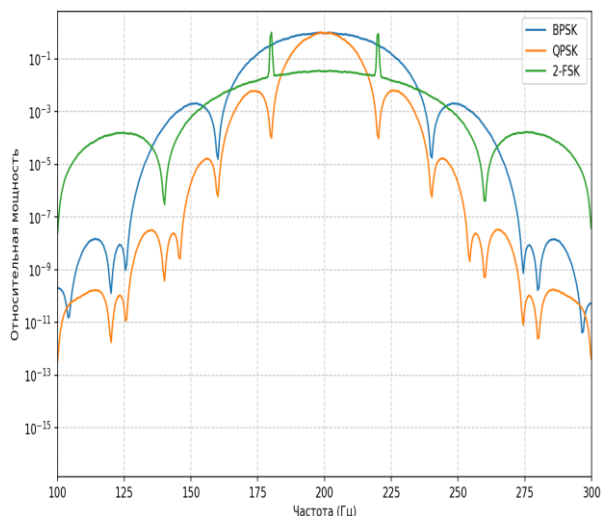


Рисунок 2 – Спектральная плотность мощности исследуемых сигналов

И для каждой схемы вычисляется спектральная эффективность по формуле [3]

$$\eta = \frac{R}{B}, \quad (4)$$

где R – битовая скорость, B – занимаемая полоса частот.

При этом полоса частот для каждого сигнала определялась на основе анализа спектральной плотности мощности. Данный анализ позволяет определить распределение энергии сигнала по частотам и установить диапазон частот, используемый при передаче информации. Для оценки использовалась ширина спектра, в которой сосредоточена основная часть энергии сигнала. За пределами этого диапазона амплитуды спектральных составляющих значительно уменьшаются, поэтому их влияние на передачу информации является незначительным.

Результаты моделирования показывают, что различные виды манипуляции характеризуются различной спектральной эффективностью. Сравнение проводилось при одинаковой битовой скорости передачи данных 40 бит/с, что позволяет корректно оценить занимаемую полосу частот для каждого метода. В рассматриваемых условиях для сигнала с двоичной фазовой манипуляцией занимаемая полоса частот составила 60,06 Гц, что соответствует спектральной эффективности 0,666 бит/с/Гц. Для частотной манипуляции занимаемая полоса частот равна 84,96 Гц, а спектральная эффективность составляет 0,471 бит/с/Гц.

Наиболее высокий результат был получен для квадратурной фазовой манипуляции. В ходе моделирования установлено, что занимаемая полоса частот для данного сигнала составляет 32,71 Гц, а спектральная эффективность достигает 1,223 бит/с/Гц. Такая эффективность объясняется тем, что один символ в ФМн-4 передает два бита информации, что позволяет передавать больший объем данных при меньшей занимаемой полосе частот. Таким образом, среди рассмотренных методов манипуляции наилучшее использование спектрального ресурса обеспечивает ФМн-4.

На основании полученных результатов рекомендуется использовать квадратурную фазовую манипуляцию в системах защищенной передачи данных. В первую очередь это обусловлено её высокой помехоустойчивостью. По результатам моделирования установлено, что сигналы с фазовой манипуляцией более устойчивы к шумовым воздействиям по сравнению с сигналами с частотной манипуляцией. При этом ФМн-4 сохраняет практически такой же уровень помехоустойчивости, как и двоичная фазовая манипуляция.

Также ФМн-4 характеризуется более высокой спектральной эффективностью по сравнению с ФМн-2 и ЧМн. При одинаковой битовой скорости передачи данных ФМн-4 занимает меньшую полосу частот, что обеспечивает более эффективное использование спектра канала связи. Таким образом, применение квадратурной фазовой манипуляции является наиболее целесообразным среди рассмотренных методов.

Список использованных источников:

1. Биккенин, Р. Р. Теория электрической связи : учеб. пособие для студ. высш. учебных заведений / Р. Р. Биккенин, М. Н. Чесноков. – М. : Издательский центр «Академия», 2010. – 336 с.
2. Ку, Х.Н. Анализ вероятности ошибки сигналов QPSK и BPSK / Х.Н. Ку // 56-я Научная Конференция Аспирантов, Магистрантов и Студентов БГУИР. – Минск, 2020.
3. Скороходов, Р.В. Анализ эффективности инфокоммуникационных систем / Р.В. Скороходов // 58-я научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР. – Минск, 2022.