

УДК 621.376+621.396

## **РЕАЛИЗАЦИЯ GFSK МОДЕМА В СРЕДЕ MATLAB**

*Кайкы М.Н.<sup>1</sup>, студент гр.950701, Тишко А.П., студент гр. 950701  
Гапоненко А. А, студент гр. 850701*

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники<sup>1</sup>  
г. Минск, Республика Беларусь*

*Порхун М.И. – магистр техн. наук*

**Аннотация.** В данной работе рассматривается реализация GFSK модема в среде MATLAB. Приведена структура модема, а также описаны его составные блоки. Приводятся основные параметры и характеристики ЧМ, FSK, MSK, GFSK модуляторов. Проанализированы параметры различных вариантов реализации связки демодулятор-детектор, а также выполнено MATLAB-моделирование системы.

**Ключевые слова.** GFSK, модуляция, демодуляция, модем.

Цифровая обработка сигналов никогда раньше не была так широко распространена, и никогда раньше не существовало столько возможностей для её реализации [1]. В нынешнем состоянии технического прогресса человечества особую роль занимает теория передачи и кодирования дискретных сообщений. Большое количество информации и ограниченное количество каналов связи породили проблему корректной, эффективной и высокоскоростной передачи данных на любые расстояния. Модем – устройство, применяющееся в системах связи для сопряжения информационного сигнала со средой его распространения, где он не может существовать без адаптации. Основными функциональными блоками модема являются модулятор и демодулятор. Модулятор осуществляет модуляцию, то есть изменяет характеристики сигнала в соответствии с изменениями входного информационного сигнала, а демодулятор – осуществляет обратный процесс при приёме данных из канала связи [2].

В данной работе рассматривается реализация модема на основе усовершенствованного вида двоичной FSK-модуляции – GFSK (Gaussian Frequency-Shift Keying). Структура реализуемого модема состоит из ряда модулей (рисунок 1):

- 1) энкодер;
- 2) модулятор;
- 3) демодулятор;
- 4) декодер;
- 5) детектор ошибок.

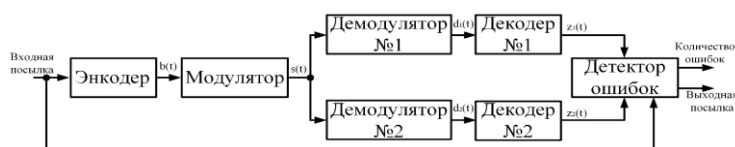


Рисунок 1 – Структура модема

Входная посылка поступает на блок энкодера, задача которого – преобразование входного информационного сигнала к виду, наиболее удобному для передачи и декодирования. На данном этапе к посылке добавляются системные биты, предназначенные для синхронизации приёмника (демодулятора) и передатчика (модулятора), а также для увеличения надёжности передачи данных. Далее сигнал поступает на блок модуляции, обеспечивающий преобразование сигнала в соответствии с принципами GFSK-модуляции. Модулированный сигнал проходит через два демодулятора, выполняющих одну и ту же функцию – выделение полезной информационной составляющей из модулированного сигнала. После этапа демодуляции сигнал поступает на два декодера, которые его расшифровывают, а затем передают информацию на детектор ошибок. Использование двух демодуляторов и двух декодеров обусловлено целью дальнейшего сравнения их работоспособности. На выходе декодеров располагается детектор ошибок демодуляции-декодирования, который сравнивает исходную информационную посылку с пришедшими на него декодированными сообщениями, и в случае обнаружения разности, указывает индексы и количество битов, переданных с ошибкой. В данной работе длина входной посылки выбрана равной 16 бит. В блоке энкодера к информационному сообщению добавляются системные биты – «стартовые» и «стоповые». В связи с тем, что передача данных модемом осуществляется асинхронно, существует необходимость предусмотреть возможность синхронизации приемника и передатчика. С этой целью к передаваемому информационному сообщению добавляются биты синхронизации: «стоповый» и «стартовый». «Стартовым» битом в данной работе выступает бит «нуля», а «стоповым» – бит «единицы». Формат передаваемой посылки приведён на рисунке 2.



Рисунок 2 – Формат посылки

Для синхронизации модулятора и демодулятора каждая посылка содержит в начале два «стоповых» бита (имитация отсутствия передачи данных) и один «стартовый» (начало передаваемой посылки), а затем 16 битную информационную часть (передаваемое слово). В конце посылки передаются два «стоповых» бита (окончание передачи).

После перекодирования (добавления системных бит) к исходной посылке она поступает на блок модулятора. В данной работе в качестве способа модуляции используется подвид частотной манипуляции – GFSK.

Частотная модуляция (ЧМ) получила большое распространение, так как слабо подвержена помехам, возникающим в линиях связи и среде передачи. В связи с высоким темпом перехода на цифровой вид хранения и передачи информации, возник новый вид модуляции – частотная

манипуляция (Frequency Shift Keying – FSK). В основе FSK лежит принцип частотной модуляции, а сами информационные сообщения представляются в виде различных частот несущего сигнала. В случае, когда алфавит состоит из двух символов, манипуляция называется двоичной [2].

Рассмотрим принцип работы простейшего двоичного FSK-модулятора. На его вход поступает  $n$ -бит, которые являются словами входного алфавита. Значение входной информационной посылки управляет ключом  $K$ , который в свою очередь переключает выходной контакт между двумя генераторами с различными несущими частотами. В результате работы такого модулятора на выходе схемы образуется синусоидальный сигнал, частота которого зависит от внутренних параметров генератора и значения передаваемой посылки. Данная реализация имеет ряд серьезных недостатков:

- 1) такой подход сложно реализовать для применения в реальных системах, поскольку требуется быстродействующий ключ с маленьким временем протекания переходного процесса;
- 2) в выходном сигнале модулятора могут образовываться разрывы сигнала в виде резких скачков, что может значительно повлиять на демодуляцию сигнала, и тем самым внести ошибку в демодулированную последовательность бит [3].

Учитывая недостатки такой реализации, на практике применяют FSK-модуляторы с непрерывной фазой, построенные на базе универсального квадратурного модулятора с формированием огибающей сигнала (рисунок 3), который и используется в данной работе.

GFSK – вид частотной манипуляции, при которой используется фильтр Гаусса для сглаживания перестроек при изменении значений входной информационной посылки. Данный подход реализуется за счёт генерации сигнала с минимальным сдвигом по частоте – Minimum-Shift Keying (MSK) [4]. Синтез такого сигнала основывается на понятии ортогональности функций синуса и косинуса. Считается, что  $m = 0.5$  – минимальный индекс, при котором демодуляция образует цифровую информацию без ошибок. Однако, при  $m < 0.5$  всё ещё можно получить цифровую информацию, но в таком виде будут присутствовать ошибки демодуляции, связанные с неортогональностью функций синуса и косинуса. Уменьшение индекса манипуляции приводит к усложнению структур демодуляторов, но при этом всё же используется на практике, например, DECT (англ. digital enhanced cordless telecommunication), Bluetooth [5]. Причина, по которой двоичная MSK получила столь большое распространение – наименьшая среди других видов двоичных манипуляций ширина главного лепестка спектра сигнала, что позволяет уменьшить ширину частот, занимаемых сигналом в эфире. В результате работ по практическому применению MSK-манипуляции инженеры стали применять фильтры, что привело к появлению GFSK – модуляции [6]. Фильтр Гаусса позволяет снизить полосу занимаемых сигналом частот в эфире при помощи фильтрации низкочастотного информационного сигнала на входе модулятора [5]. Ширину спектра сигнала, полученного такой модуляцией, принято связывать с длительностью передаваемого символа и полосой пропускания фильтра. Импульсная характеристика фильтра Гаусса имеет следующий вид [3]:

$$h(t) = B \sqrt{\frac{2\pi}{\ln(2)}} e^{-\frac{2(B \cdot t \cdot \pi)^2}{\ln(2)}} \quad (1)$$

где  $B$  — полоса пропускания фильтра по уровню -3 дБ,  $t$  – время в секундах.

Полоса занимаемых частот радиосигнала напрямую зависит от частоты пропускания фильтра Гаусса: чем уже полоса пропускания фильтра – тем меньше полоса частот в эфире. Стоит отметить, что с уменьшением полосы пропускания фильтра, увеличиваются межсимвольные искажения, что приводит к увеличению ошибки в модулированном сигнале. Ещё одна особенность – межсимвольные искажения также зависят от предыдущих передаваемых символов. Подобные проблемы обычно устраняют эквалайзером либо сверточным декодером Витерби, но в данной работе эти аспекты рассматриваться не будут. Также, следует отметить, что при GFSK-модуляции может использоваться не только квадратурный модулятор, а и генератор сигнала, управляемый по частоте [4].

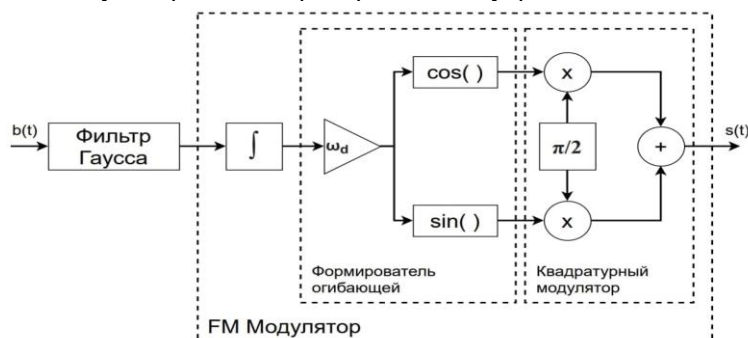


Рисунок 3 – Структура модулятора

Сигнал с выхода энкодера  $b(t)$  проходит через фильтр Гаусса, а затем интегрируется и

усиливается в  $\omega_d$  – раз, где  $\omega_d$  – частота девиации сигнала. Смысл использования блока интегратора заключается в получении мгновенной фазы FSK сигнала. Если имеется модулирующий сигнал, из которого сформированы синфазная и квадратурная компоненты комплексной огибающей сигнала, то можно перенести её на любую частоту при помощи схемы универсального квадратурного преобразователя. Способ формирования комплексной огибающей в зависимости от модулирующего сигнала определяет вид модуляции. Любое комплексное число можно представить в виде точки на комплексной плоскости, а комплексный сигнал можно интерпретировать как комплексную функцию времени, такая интерпретация носит название – комплексной огибающей.

В ходе работы синтезированы два демодулятора и два декодера GFSK сигнала. Первый демодулятор основан на двух полосовых фильтрах и детекторах огибающей (рисунок 4), второй демодулятор (рисунок 5) основан на умножении двух сигналов, исходного и его же, но сдвинутого по фазе. К преимуществам первого демодулятора можно отнести высокую помехозащищённость, второго – простоту исполнения. К недостаткам: первый демодулятор требует большего количества аппаратных ресурсов на реализацию, второй – более подвержен паразитным составляющим в сигнале [8]. Декодер № 1 работает по принципу анализа амплитуды и знака сигнала на середине интервала приёма бита из информационного сообщения. Второй декодер основан на вычислении суммы положительных и отрицательных значений сигнала при приёме бита данных.

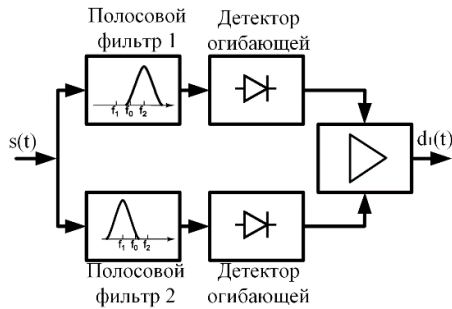


Рисунок 4 – Структура демодулятора №1

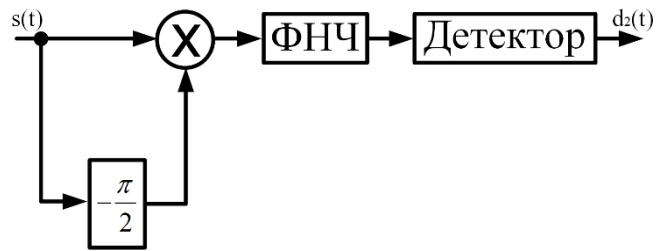
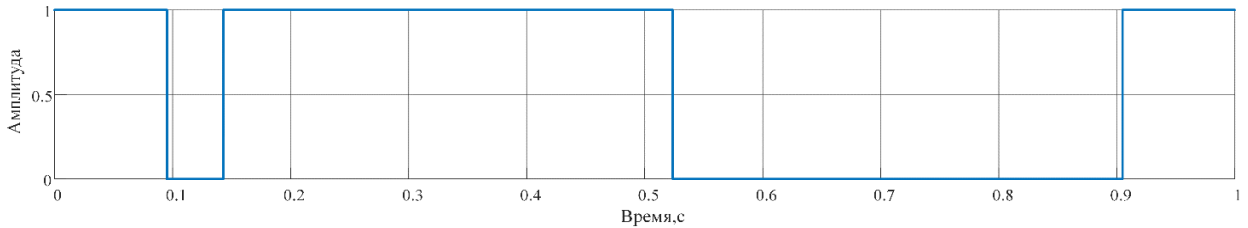
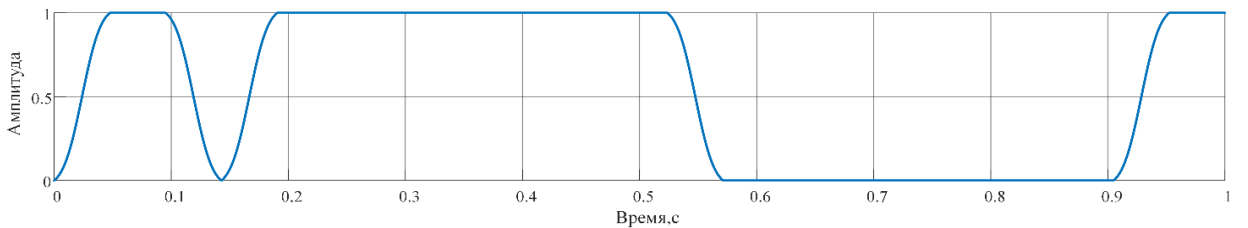


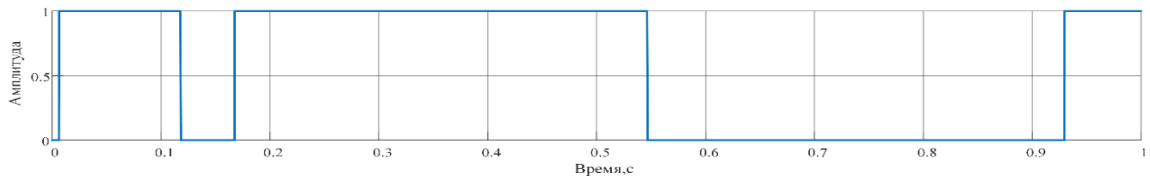
Рисунок 5 – Структура демодулятора №2



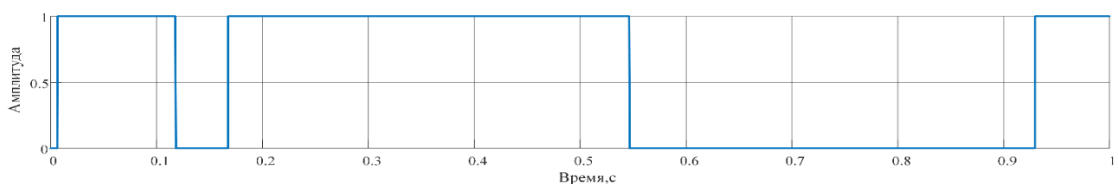
а)



б)



в)



г)

Рисунок 6 – Сигналы в GFSK-модеме: а – входная информационная последовательность; б – сигнал со входа FM-модулятора (после фильтра Гаусса); в – сигнал с выхода детектора №1; г – сигнал с выхода детектора №2;

Из рисунков 6б-в видно, что выходные сигналы смещены по времени относительно исходного информационного сообщения в следствии применения фильтра Гаусса. Сигналы с выходов детекторов (рисунок 6в-г) практически не отличаются друг от друга и совпадают с исходной посылкой, что свидетельствует о корректности работы системы. Помимо MATLAB-моделирования работы модема, также проводилось тестирование на количество ошибок процесса демодуляции-декодирования. Так, разные демодуляторы в связке с разными декодерами дали различные результаты точности и помехозащищённости. На основании тестирования был сделан вывод о том, что в отдельной практической реализации GFSK-модема требуется учитывать исключительно индивидуальные особенности зашумлённости эфира и качества выходного сигнала, в нашем же случае, при моделировании работы системы лучше всего себя показал демодулятор №1 (на основе полосовых фильтров) в связке со декодером №2 (сумма амплитуд отсчётов). Таким образом, в работе рассмотрена реализация GFSK-модема в среде MATLAB. Приведены особенности реализации различных связок демодулятор-детектор, а также проанализирована корректность их работы. Работоспособность модема показана путём MATLAB-моделирования.

**Список использованных источников:**

1. Лайонс Р. Цифровая обработка сигналов. Второе издание. Пер. с англ./ Р. Лайонс // М. : ООО «Бином-Пресс», 2006.
2. Модем [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Модем>. - Дата доступа: 08.04.2021.
3. FSK модуляция [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://ru.dsplib.org/content/signal\\_fsk/signal\\_fsk.html](https://ru.dsplib.org/content/signal_fsk/signal_fsk.html). - Дата доступа: 10.04.2021.
4. Модуляция GMSK в современных системах радиосвязи [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.chipinfo.ru/literature/chipnews/200108/3.html>. - Дата доступа: 15.04.2021.
5. Давыдов А.В. Цифровая обработка сигналов: Тематические лекции / А.В. Давыдов // Екатеринбург : Фонд электронных документов, 2005. – 185 с.
6. Schiphorst R., Hoeksema F.W., Slump, C. Bluetooth demodulation algorithms and their performance / R. Schiphorst, F.W. Hoeksema, C. Slump // Proceedings of the Second Karlsruhe Workshop on Software Radios, Karlsruhe : Universitat Karlsruhe Institut fur Nachrichtentechnik, 2002. – P. 99-106.
7. FSK, GFSK, MSK, GMSK и некоторые другие режимы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.radioscanner.ru/info/article345/>. - Дата доступа: 16.04.2021.
8. FSK: Сигналы и их демодуляция [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.leoniv.diod.club/articles/pdf/fskdemod.pdf>. - Дата доступа: 16.04.2021.

UDC 621.376+621.396

## IMPLEMENTING GFSK MODEM IN MATLAB ENVIRONMENT

*Kaiky M., Tishko A.P. Haponenko A.A.*

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus*

*Porhun M.I. – Master of Engineering Science*

**Annotation.** This article deals with the implementation of the GFSK modem in the MATLAB environment. The structure of the modem is given, as well as its constituent blocks are described. The main parameters and characteristics of FM, FSK, MSK, GFSK modulators are given. The parameters of various options for implementing the demodulator-detector coupling are analyzed, and MATLAB-simulation of the system is performed.

**Keywords.** GFSK, modem, modulation, demodulation.