

Цветков Фёдор Алексеевич, Михайловский Виталий Алексеевич,
Васильев Василий Васильевич

МОДЕЛЬ 4GFSK-КАНАЛА ДЛЯ КВ-РАДИОСВЯЗИ

В докладе показывается результат моделирования на языке LabVIEW канала для КВ-радиосвязи сигналом со структурой 4GFSK и аддитивным нормальным шумом.

Оценены зависимости вероятности битовой ошибки от уровня шума для сигнала минимальной структуры, с кодером Голя и с перемежением бит. Результаты моделирования проиллюстрированы временными диаграммами в ключевых точках модели.

Благодарности: Материалы статьи подготовлены при поддержке проекта № ВнГр/23-01-РТ «Исследование программно определяемых радиосистем» в Южном федеральном университете.

Моделирование, 4GFSK-сигнал, MLS-последовательность, кодер Голя, перемежение бит, LabVIEW.

Fedor Alekseevich Tsvetkov, Vitaly Alekseevich Mikhailovsky,
Vasily Vasilyevich Vasiliev

4GFSK-CHANNEL MODEL FOR HF RADIO COMMUNICATION

The report shows the result of modeling in the LabVIEW language of a channel for HF radio communication with a signal with a 4GFSK structure and additive normal noise.

The dependences of the probability of bit error on the noise level for a signal of minimal structure, with a Golay encoder and with bit interleaving are estimated. The simulation results are illustrated by time diagrams at key points of the model.

Acknowledgements: The materials of the article were prepared with the support of project No. VnGr/23-01-RT "Research of software-defined radio systems" at the Southern Federal University

Modeling, 4GFSK signal, MLS sequence, Golay encoder, bit interleaving, LabVIEW.

Введение

Одним из приоритетов научно-технологического развития науки, технологий и техники в Российской Федерации является обеспечение связанности арктической территории Российской Федерации за счет создания интеллектуальных телекоммуникационных систем, в частности путем применения цифровых каналов радиосвязи в коротковолновом (КВ) диапазоне при передаче сигналов на большие дистанции, а также сигналов, имеющих повышенную устойчивость к флуктуациям параметров этих каналов радиосвязи.

Для радиосвязи в КВ-диапазоне широко применяются сигналы с частотной манипуляцией (ЧМн или FSK – frequency shift key), устойчивые к флуктуации амплитуды и фазы несущей [1 – 3]. Для уточнения устойчивости таких сигналов к помехам, в частности к аддитивному нормальному шуму, при различных алгоритмах их формирования и обработки была разработана на языке LabVIEW модель канала для КВ-радиосвязи сигналом со структурой 4GFSK (гауссово FSK с 4-мя частотными позициями).

Основная часть

Структурная схема моделировавшегося канала связи показана на рис. 1.

Датчик передаваемых битов формирует последовательность из 120 псевдослучайных передаваемых битов.

В кодере Голея (12/23) они разделяются на 10 подпоследовательностей длиной 12 бит каждая. Каждая подпоследовательность дополняется 11-битовой контрольной суммой Голея и одним битом четности. Полученные 24-битовые подпоследовательности объединяются в одну последовательность длиной 240 бит.

Переमेжитель бит разделяет эту последовательность на 10 блоков длиной по 24 бита и составляет 2-мерный массив, в котором каждый блок является строкой; затем этот массив транспонируется, из него извлекаются

24-битовые строки, которые последовательно пристыковываются одна к другой. В результате образуется последовательность их 240 перемеженных бит.

В модели предусмотрено 3 варианта формирования передаваемого битового сигнала:

а) 120 передаваемых бит подаются непосредственно на вход вычислителя индексов частот поднесущих минуя кодер Голея и перемежитель битов;

б) 120 передаваемых бит проходят через кодер Голея и получившиеся 240 бит подаются на вход вычислителя индексов частот поднесущих минуя перемежитель битов;

в) 120 передаваемых бит проходят через кодер Голея и перемежитель битов и в виде 240 битов подаются на вход вычислителя индексов частот поднесущих.

Вычислитель индексов частот поднесущих разделяет получаемую им последовательность на последовательность 2-битовых кодов, каждый из которых является номером (индексом) элемента в таблице частот из 4-х равноотстоящих поднесущих. Полученная последовательность индексов частот подается на формирователь образов, в который подаются отсчеты последовательности максимальной длины ML_S , используемой для синхронизации передатчика и приемника.

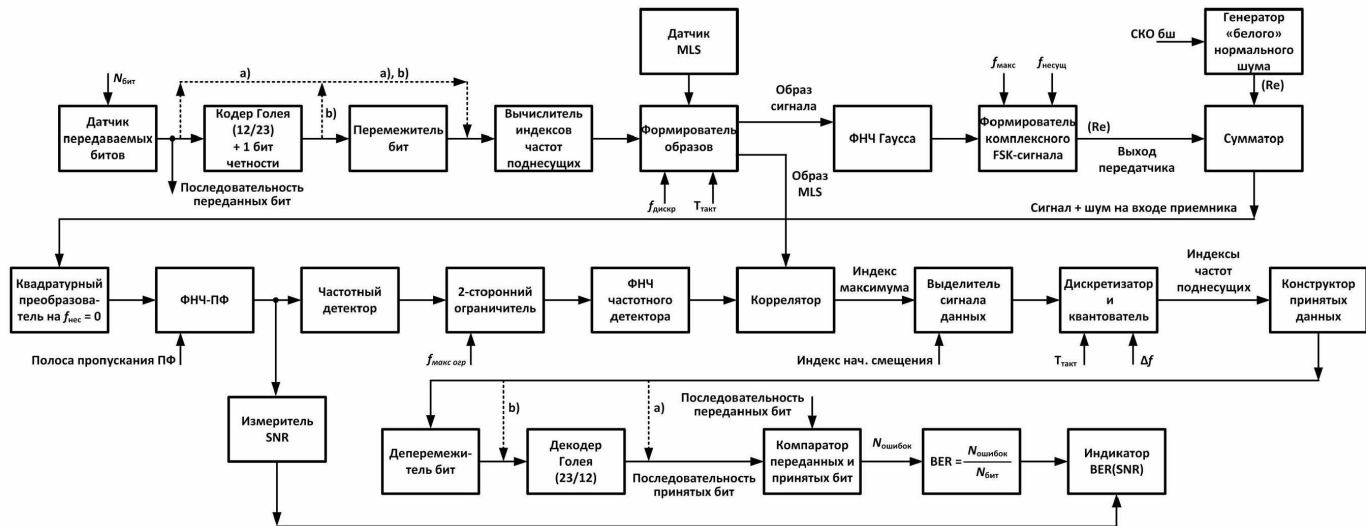


Рис. 1. Структурная схема канала связи

Последовательность максимальной длины формировалась имеющимся в LabVIEW узлом **Binary MLS VI** с параметрами N MLS, MLS order, MLS seed и MLS initialize? Последующее исследование показало, что нужное качество синхронизации достигается при N MLS = 16, MLS order = 4, MLS initialize? = True и MLS seed = 7FFFFFFFFFFFFFFF. Эта последовательность имеет вид 1110001001101011.

В формирователе образов MLS-последовательность вставляется перед последовательностью сигнальных индексов частот, а затем создается образ частот поднесущих передаваемого сигнала из величин +3, +1, -1, -3, где «+3» означает максимальную частоту поднесущей, «-3» – минимальную, а MLS-биты кодируются максимальной и минимальной частотой. Кроме того, отдельно создается образ MLS-последовательности из величин «+1», «-1» для использования в корреляторе приемника. Оба образа создаются в виде последовательности отсчетов с частотой дискретизации $f_{\text{дискр}}$ и длительностью тактового интервала $T_{\text{такт}}$, т.е. в виде последовательностей отсчетов с заданными временными параметрами. На рис. 2 представлена последовательность отсчетов образа MLS-последовательности при $f_{\text{дискр}} = 48$ кГц и $T_{\text{такт}} = 20$ мс (в одном такте 960 отсчетов), а на рис. 3 – последовательность отсчетов образа сигнала с MLS-последовательностью в ее начале при тех же временных параметрах и некоторой псевдослучайной последовательности из 120 передаваемых битов.



Рис. 2. Последовательность отсчетов образа MLS-последовательности



Рис. 3. Последовательность отсчетов образа сигнала

Последовательность отсчетов образа сигнала имеет резкие перепады уровней, которые вызовут излишне широкий спектр излучаемого передатчиком сигнала. Для уменьшения ширины спектра сигнала образ сигнала

пропускается через ФНЧ Гаусса с конечной импульсной характеристикой. Импульсная характеристика ФНЧ Гаусса показана на рис. 4, она имеет параметры: длина – 960 отсчетов, «СКО» – 180 отсчетов.

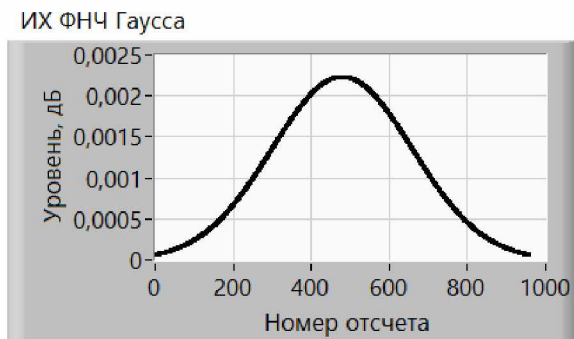


Рис. 4. Импульсная характеристика ФНЧ Гаусса

На рис. 5 показан образ сигнала на выходе ФНЧ Гаусса.

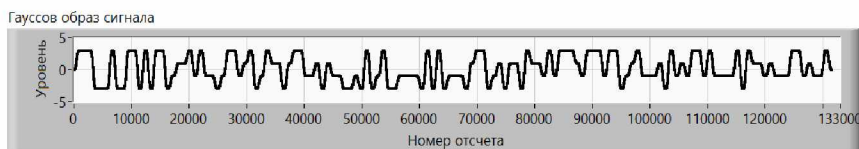


Рис. 5. Образ сигнала на выходе ФНЧ Гаусса

Формирователь комплексного FSK-сигнала является частотным модулятором комплексного несущего колебания со средней частотой $f_{\text{несущ}}$ и девиацией частоты $f_{\text{макс}}$. График отклонений мгновенной частоты этого колебания от несущей при $f_{\text{макс}} = 150$ Гц показан на рис. 6.

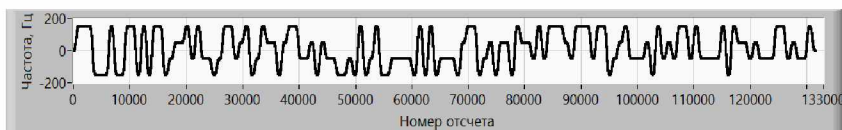


Рис. 6. График отклонений мгновенной частоты от несущей

В формирователе перед и после сигнала добавляются массивы нулевых отсчетов для оценки в их месте в приемнике уровня шумов. У сфор-

мированного комплексного FSK-сигнала с ненулевой частотой несущей используется только вещественная составляющая, как это и происходит в передатчиках радиопередающих устройств. На рис. 7 показан вид этого сигнала при частоте несущей $f_{\text{несущ}} = 2$ кГц.

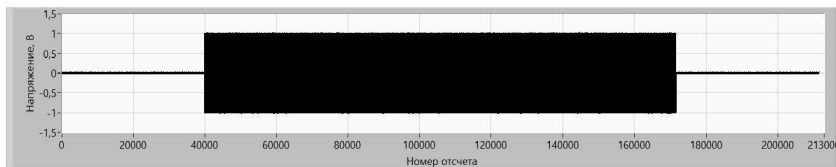


Рис. 7. Сигнала на выходе передатчика

Генератор «белого» нормального шума вырабатывает отсчеты псевдослучайного вещественного некоррелированного гауссова шума с заданным среднеквадратическим отклонением СКО бш. Сумма этого шума с отсчетами сигнала с выхода передатчика рассматривается как входной сигнал приемника.

В приемнике сигнал с шумом сначала «сдвигается» по частоте на частоту несущей, равной нулю, квадратурным преобразователем частоты. Подбирая частоту гетеродина в этом преобразователе можно задать сигналу на его выходе не точно нулевую частоту несущей, имитируя не точную настройку приемника на частоту сигнала. Выходной комплексный сигнал преобразователя частоты проходит через комплексный полосовой фильтр с полосой пропускания Π и центральной частотой равной нулю, т.е. его полоса пропускания от $-\Pi/2$ до $+\Pi/2$. Реализуется этот фильтр двумя идентичными вещественными КИХ-фильтрами нижних частот с верхними граничными частотами $\Pi/2$, фильтрующими раздельно вещественную и мнимую составляющую комплексного входного сигнала. После фильтрации выполняется понижение частоты дискретизации. На рис. 8 показана реализация смеси комплексного сигнала и шума после фильтра (частота дискретизации 4 кГц, отношение сигнал/шум 5,0 дБ).

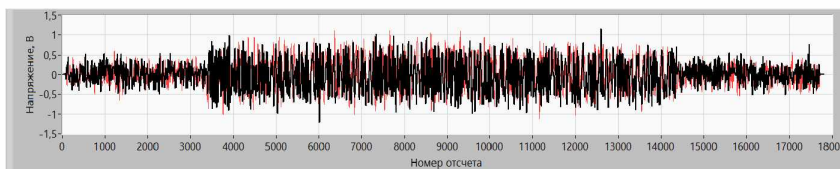


Рис. 8. Сигнала на выходе ФНЧ ПФ

Для измерения отношения сигнал/шум (ОСШ или SNR) выделяется два фрагмента входного сигнала с 300-го и 14500-го отсчета длиной 3000 отсчетов и по ним оценивается $\text{СКО}_{\text{ш}}$ шума, а по фрагменту с 3600-го отсчета длиной 10500 отсчетов – $\text{СКО}_{\text{сш}}$ смеси сигнала с шумом. После этого ОСШ оценивается по формуле

$$\text{ОСШ} = \frac{\sqrt{\text{СКО}_{\text{сш}}^2 - \text{СКО}_{\text{ш}}^2}}{\text{СКО}_{\text{ш}}}$$

Частотный детектор вычисляет мгновенную частоту по формуле [4]

$$f(t_i) = \frac{f_{\text{д}}}{2\pi} \arg[u(t_i) \cdot u^*(t_{i-1})],$$

где $\arg[\dots]$ обозначает угол (фазу или аргумент в радианах) комплексного числа в квадратных скобках, $u(t_i)$ – текущий отсчет детектируемого сигнала, $u(t_{i-1})$ – предыдущий отсчет.

Непосредственно после частотного детектора из-за присутствия шумов сигнал имеет короткие выбросы в диапазоне $\pm f_{\text{дискр}}$ (в данном случае ± 2 кГц). Особенно часто выбросы повторяются на интервалах отсутствия сигнала. Эти выбросы не позволяют корректно работать синхронизатору на основе коррелятора. Поэтому выходной сигнал детектора пропускается через двусторонний ограничитель по уровням $\pm f_{\text{макс отр}}$ (в данном случае $f_{\text{макс отр}} = 450$ Гц) и через ФНЧ частотного детектора ($f_{\text{макс}} = 50$ Гц). На рис. 9 показаны сигнал на выходе двустороннего ограничителя и сигнал на выходе ФНЧ частотного детектора при ОСШ = 6 дБ.

На рис. 10 показан сигнал на выходе коррелятора: взаимокорреляционная функция между сигналом на выходе ФНЧ частотного детектора и децимированного образа MLS так же при ОСШ = 6 дБ. Абсцисса ее максимума принимается за оценку момента начала сигнала данных.

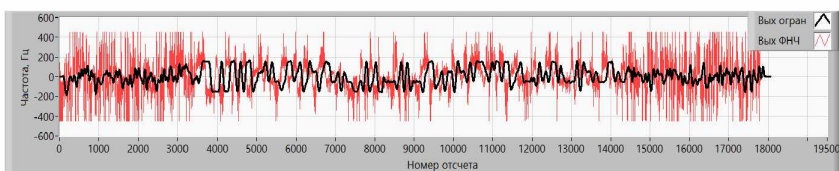


Рис. 9. Сигнала на выходе ограничителя и ФНЧ ЧД

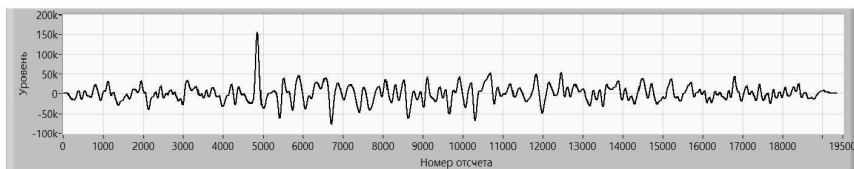


Рис. 10. Сигнала на выходе коррелятора

Выделитель сигнала данных выделяет массив отсчетов сигнала данных от найденного момента его начала, при этом начало этого массива несколько корректируется от максимума взаимокорреляционной функции. На рис. 11 показан выделенный массив отсчетов (Вых ФНЧ ЧД).

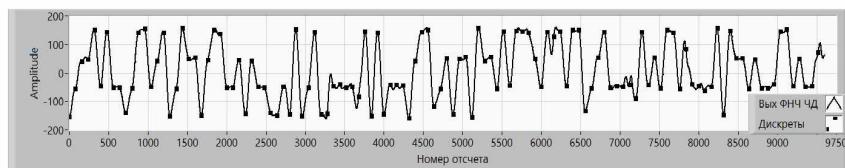


Рис. 11. Выделенный массив отсчетов и дискреты через интервалы $T_{\text{такт}}$

Дискретизатор из выделенного массива отсчетов выбирает отсчеты (дискреты) через интервалы времени $T_{\text{такт}}$, несущие информацию о переданных данных. На рис. 11 дискретные отсчеты показаны точками.

Квантователь определяет номер кванта (индекс частоты поднесущей) высотой Δf , в котором оказывается каждый отсчет. Из рис.11 видно, что точки-дискреты группируются в четырех зонах-квантах высотой $\Delta f = 100$ Гц, разделенных уровнями -100 Гц, 0 Гц и $+100$ Гц. Номер кванта является индексом частоты поднесущей и указывает на пересылаемый 2-х битовый код данных.

Конструктор принятых данных по индексам частот поднесущих определяет 2-х битные коды и собирает их в последовательность из 240 бит, которая подается на депережежитель бит, восстанавливающий исходную последовательность бит.

В декодере Голея эта последовательность сначала разделяется на 10 блоков по 24 бита, каждый из которых подвергается декодированию Голея «23/12», позволяющему исправить до 3-х ошибочных бит. В результате получается 10 последовательностей по 12 бит, объединяемых в последовательность принятых бит. Компаратор кодовых последовательностей сравнивает принятые и переданные биты, подсчитывает количество оставших-

ся ошибочных бит $N_{\text{ошибок}}$ и вычисляет оценку вероятности битовой ошибки

$$\text{BER} = \frac{N_{\text{ошибок}}}{N_{\text{бит}}}$$

Так как передаваемые биты – псевдослучайная последовательность и шум тоже псевдослучайная последовательность, то вычисленное BER является флуктуирующей оценкой. Для повышения ее устойчивости в модели предусмотрено многократное повторение вышепоказанных вычислений и усреднение получаемых оценок BER. Усредняются также и получаемые значения ОСШ. После достижения достаточно стабильной пары BER-ОСШ СКО бп уменьшается и все расчеты повторяются. В результате получается зависимость BER(ОСШ).

Разработанная модель позволяет исследовать влияние параметров модели на BER. Например, исследовано влияние использования кодирования Голея и перемежения. На рис. 12 показаны зависимости BER(ОСШ) для этих трех ситуаций.

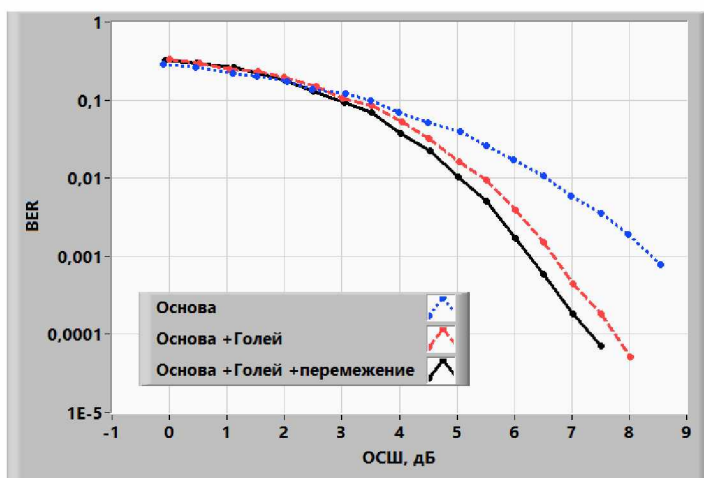


Рис. 12. Зависимости BER(ОСШ) для трех алгоритмов

Выводы

В работе описана программная модель 4GFSK-канала для КВ-радиосвязи, написанная на языке LabVIEW. Модель обладает большой гибкостью, возможностью подстройки многих параметров модели.

Продemonстрирована зависимость вероятности битовой ошибки от структуры алгоритма обработки сигналов.

Работа выполнена в рамках проекта № ВнГр/23-01-РТ «Исследование программно определяемых радиосистем» в Южном федеральном университете».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Прокис Джон*. Цифровая связь. Пер. с англ. /Под ред. Д.Д. Кловского. – М.: Радио и связь. 2000. – 800 с.: ил.
2. Скляр Бернард. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Изд. 2-е, испр. : Пер. с англ. – М. : Издательский дом «Вильямс», 2007. – 1104 с. : ил. – Парал. тит. англ.
3. *Дворкович В.П., Дворкович А.В.* Теория, практика и метрология аудиовизуальных систем. – М.: Техносфера, 2019. – по 1396 с.: ил. В 2-х книгах.
4. *Цветков Ф.А.* Программно-конфигурируемые радиоустройства: принципы построения и алгоритмы обработки сигналов: учебное пособие / Ф.А. Цветков, В.В. Терешков; Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2020. – 143 с.

Цветков Фёдор Алексеевич, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник ИРТСУ, доцент кафедры ТОР ИРТСУ, Россия, г.Таганрог, ул. Энгельса, 1, 347900, телефон: +7-928-139-58-99, email: facvetkov@sfedu.ru.

Михайловский Виталий Алексеевич, директор ООО «Эксперт Групп», Россия, 347923, Ростовская область, г.о. город Таганрог, г. Таганрог, ул. Инструментальная 2-31, строение 5, телефон: +7-928-901-85-78, email: vitaly@sunsdr.com.

Васильев Василий Васильевич, исполнительный директор ООО «Ратем», Россия, 347923, Ростовская область, г.о. город Таганрог, г. Таганрог, ул. Инструментальная 2-31, строение 5, телефон: +7-928-777-70-68, email: vasily@sunsdr.com.

Tsvetkov Fedor Alekseevich, Candidate of Technical Sciences, Leading researcher of RTSU, Associate Professor of the Department of TOP IRSU, Russia, Taganrog, Engels str., 1, 347900, phone: +7-928-139-58-99, email address: facvetkov@sfedu.ru.

Mikhailovsky Vitaly Alekseevich, Director of Expert Group LLC, Russia, 347923, Rostov region, Taganrog city, Taganrog, Instrumentalnaya str, 2-31, building 5, phone: +7-928-901-85-78, email: vitaly@sunsdr.com.

Vasiliev Vasily Vasilyevich, Executive Director of LLC «Ratem», Russia, 347923, Rostov region, Taganrog city, Taganrog, Instrumentalnaya str, 2-31, building 5, phone: +7-928-777-70-68, email: vasily@sunsdr.com.