

Министерство образования и науки Российской Федерации
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)
Радиофизический факультет (РФФ)
Кафедра радиофизики (РФ)

УТВЕРЖДАЮ
Зав. кафедрой
Якубов В.П. _____
« ____ » _____ 2018

ШИРОКОПОЛОСНАЯ СИСТЕМА СВЯЗИ С ПСЕВДОСЛУЧАЙНОЙ
ЦИФРОВОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

Кокин Дмитрий Сергеевич

Руководитель
к.ф.-м.н., доцент
_____ О.Г. Пономарев
подпись
« ____ » _____ 2018г.

Студент группы №721
_____ Д.С. Кокин
подпись

Томск-2018

Оглавление

Введение.....	3
1. Особенности систем связи с прямым расширением спектра	5
1.1. Методы расширения спектра	5
2. Выбор программной среды для моделирования работы системы связи с псевдослучайной цифровой модуляцией.....	8
2.1. Описание выбранной среды для разработки численной модели системы связи с псевдослучайной цифровой модуляцией	11
2. Разработка алгоритмов работы модулятора и демодулятора, использующих в качестве модулируемого сигнала цифровую псевдослучайную последовательность.....	16
2.1. Квадратурная фазовая манипуляция сигналов (QPSK)	16
2.3. Алгоритмы работы модулятора и демодулятора псевдослучайной цифровой последовательности	20
2.4. Разработка методов и алгоритмов синхронизации приемного и передающего трактов, обеспечивающих возможность когерентной обработки сигнала при его демодуляции	23
Система связи с псевдослучайной цифровой модуляцией	25
Функциональная схема передающего устройства.....	26
Функциональная схема приемного устройства	28
Заключение	33

Введение

Системы связи, в которых псевдослучайная последовательность используется для расширения спектра, были разработаны еще в первой половине прошлого века. На тот момент они рассматривались, лишь как теоритическая возможность улучшить имеющиеся узкополосные системы, и не были включены в конструкторские решения из-за сложности, связанной с элементарной базой, которая на то время не позволяла реализовать устройства формирования и обработки в приемлемых габаритах. Еще одной причиной, по которой интерес к таким системам связи не возрос в те времена, является отсутствие необходимости иметь высокую помехозащищенность каналов связи, поскольку мощности помех были невысоки. Сегодня, в условиях городской застройки и наличия огромного числа излучателей, мощность помех на входе приемника может в несколько раз превышать мощность полезного сигнала[1, 2].

К началу 21 века ситуация в плане материальной базы изменилась, и на смену гигантским аналоговым схемам, приходят программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС) с меньшими размерами и огромными возможностями, самые распространенные и доступные для исследователя схемы включают в себя до 1-го миллиона логических единиц, что уместается на плате размером 20 см², по скорости обработки сигналов у таких микросхем нет аналогов. Такая скорость достигается за счет параллельного вычисления, что отличает ПЛИС от процессорных систем. Еще одним достоинством является возможность многократного программирования кристалла, что позволяет дорабатывать устройство, просто перезаписав файл прошивки.

Все эти факторы приводят к тому, что интерес к цифровым системам, использующим для расширения спектра цифровые псевдослучайные последовательности, растет с каждым днем. Решено немало важных проблем связанных с передачей и приемом сверхширокополосных сигналов. Главным

достоинством таких систем, является возможность разделения абонентов в канале связи за счет использования отличных друг от друга псевдослучайных последовательностей.

Основная проблема при практической реализации широкополосных систем связи заключается в синхронизации генераторов псевдослучайных последовательностей на приемной и передающей сторонах канала связи. Задачей, поставленной при выполнении настоящей НИР, стала разработка принципов функционирования одного из возможных вариантов системы связи с цифровой псевдослучайной модуляцией сигналов, ориентированных на когерентную обработку шумового сигнала в приемном тракте, реализация разработанных принципов в виде численной модели, обеспечивающей проверку работоспособности разработанной системы

1. Особенности систем связи с прямым расширением спектра

Сигналы, у которых произведение активной ширины спектра F на длительность T много больше единицы относятся к широкополосным (сложным, шумоподобным) сигналам. Такую характеристическую величину называют базой сигнала B , т.е.

$$B = FT \quad (1)$$

В цифровых системах связи, информация представлена в виде последовательности двоичных символов, длительность шумоподобного сигнала T в таких системах обратно пропорциональна скорости передачи R , следовательно, база сигнала выражается следующим соотношением:

$$B = \frac{F}{R} \quad (2)$$

Если $B \gg 1$, то $F \gg R$, поэтому системы связи с шумоподобными сигналами называют системами с расширенным спектром. Сигналы с расширенным спектром являются псевдослучайными, т.е. обладают теми же свойствами, что и у случайного процесса или шума, хотя формируются по определенным алгоритмам.

1.1. Методы расширения спектра

Основными способами расширения спектра (широкополосной модуляции) в современных цифровых системах связи являются:

- 1) Метод прямого расширения спектра сигнала или как его принято называть в англоязычной литературе – Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)
- 2) Псевдослучайная перестройка рабочей частоты или другое название Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS)

Ниже на рис. 1 представлена устоявшаяся модель цифровой широкополосной системы связи с прямым расширением спектра



Рис.1. Модель цифровой системы связи с прямым расширением спектра

Генераторы псевдослучайной последовательности (ПСП) на приемной и передающей сторонах одинаковы и используются вначале для расширения спектра передаваемого в канал связи сигнала (передающая сторона), а затем для сжатия и демодуляции (приемная сторона). Проблема синхронизации генераторов на обеих сторонах канала связи является основной проблемой, при реализации широкополосных систем.

Для расширения спектра в таких системах, часто используют двоичную фазовую модуляцию BPSK(от англ. Binary Phase Shift Keying). Информационная манипуляция обычно так же фазовая, однако можно использовать и другие способы. Входные биты информационного сообщения перемножаются с отсчетами ПСП, затем выполняется непосредственно фазовая модуляция. Время за которое входные биты информационного сообщения остаются в неизменном состоянии в десятки раз больше времени, за которое изменяются отсчеты ПСП.

На рис. 2 изображена функциональная схема (модель) системы связи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты (ППРЧ).



Рис. 2. Модель системы связи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты

При ППРЧ расширение спектра в отличие от прямого метода расширения происходит за счет перестройки по случайному закону рабочей (несущей) частоты модулятора. В приемнике реализуют обратную

процедуру, что приводит к сужению спектра сигнала. Недостаток такой системы в том, что при смене частоты модуляции наблюдаются скачки начальной фазы несущей. Этот факт приводит к необходимости использования некогерентной демодуляции на приемной стороне, что заметно снижает эффективность кодирования.

При использовании рассмотренных способов расширения спектра на выходе модулятора формируется радиосигнал с полосой частот в несколько десятков раз превышающей занимаемую исходным сообщением полосу частот. Энергия такого сигнала распределена во всей выделенной полосе, а не сосредоточена вблизи несущего колебания, как это наблюдается у узкополосных сигналов. Такая частотная избыточность дает ряд преимуществ, таких как:

- 1) Высокая помехоустойчивость
- 2) Многоабонентность канала связи, за счет использования отличных друг от друга псевдослучайных последовательностей.
- 3) Дешевизна реализации
- 4) Высокая энергетическая скрытность за счет низкого уровня спектральной плотности.

2. Выбор программной среды для моделирования работы системы связи с псевдослучайной цифровой модуляцией

Система проектирования оптимально ориентированная под решаемую задачу значительно упрощает процесс исследования и позволяет получить необходимые расчеты в максимально короткие сроки. За десятки лет существования ЭВМ разработано огромное количество численных методов, применяемых для решения проблем разных прикладных областей. Для каждой такой области созданы системы автоматизированного проектирования, которые объединяют в себе весь необходимый набор методов и решений, а так же предоставляют удобный и понятный интерфейс. Настоящая магистерская работа направлена на проектирование цифровых приемного и передающего устройств. Основным результатом работы является описание этих устройств на языке VHDL (англ. VHSIC (Very high speed integrated circuits) Hardware Description Language). Однако для описания устройства стандартным способом, т.е. написанием текста с соблюдением всех синтаксических требований языка VHDL, требуется огромное количество времени. Учитывая человеческий фактор, вероятность появления ошибок и опечаток при наборе текста крайне высока, что, в свою очередь, так же приводит к затрате времени при отладке.

Принимая во внимание особенности работы и для уменьшения времени разработки системы связи, произведен поиск автоматизированного программного продукта, который значительно упрощает процесс моделирования и тестирования динамических систем, т.е. систем, состояние которых меняется во времени. Система связи, численная модель которой является задачей для настоящей НИР, является цифровой системой связи, основные блоки которой работают в дискретном времени. Таким образом, к требованиям к среде разработки необходимо добавить возможность моделирования систем дискретного времени.

Среди систем разработки, предназначенных для моделирования и прототипирования радиотехнических устройств можно выделить несколько уровней. Во-первых, – это системы типа Altium Designer, MentorGraphics Modelsim, Xilinx Vivado Design Suite. Инструментарий, предоставляемый этими системами, позволяет провести высокоточное моделирование работы аналоговых (Altium Designer) и цифровых (все остальные системы) устройств. С другой стороны, все эти среды разработки и моделирования можно отнести к низкоуровневым системам, в которых описание разрабатываемых устройств доведено до отдельных элементов и, как следствие, основное внимание при разработке уделяется не идеям и принципам функционирования, а конкретным техническим приемам их реализации.

Ко второй группе можно отнести такие среды, как Mathsoft Mathcad, Wolfram Research Mathematica и т.д. Идеология сред разработки этого уровня ориентирована на высокоуровневое описание разрабатываемых систем с акцентом на математические преобразования, производимые над обрабатываемыми сигналами. По-видимому, можно говорить о том, что описание радиотехнических устройств в таких системах является слишком высокоуровневым, абстрактным, не позволяет отслеживать динамику изменения состояния моделируемой системы во времени.

Наконец, к средам разработки и моделирования третьей группы можно отнести такие системы, как National Instruments LabView и Mathworks MatLab/Simulink. В системах этого уровня сочетаются мощные средства для выполнения различных математических расчетов с ориентацией на моделирование работы систем во времени. Такое сочетание позволяет сосредоточиться на разработке высокоуровневой архитектуры моделируемого устройства, отслеживая при этом особенности взаимодействия различных частей устройства. Выбор между указанными выше двумя системами во многом является делом вкуса и личных предпочтений. Идеология работы в LabView прежде всего ориентирована на

моделирование откликов того или иного блока устройства на изменяющиеся во времени входные воздействия. В MatLab/Simulink основное внимание уделяется описанию устройств в пространстве состояний, когда на основе предыдущего состояния устройства или его блока и изменения значений входных сигналов рассчитывается новое состояние, а уже на его основе производится расчет выходных значений. Основным языком программирования является одноименный высокоуровневый язык, включающий основанные на матрицах структуры данных. Среда широко используется в таких областях, как:

- 1) Цифровая обработка сигналов и радиосвязь
- 2) Обработка видеоизображений
- 3) Автоматизация тестирования и измерений и т.п.

Программный пакет MatLab/Simulink обладает огромным набором расширений Toolbox для работы с различными внешними устройствами. Это позволяет пользователю получить доступ к сторонним данным, не покидая привычной программной среды. Так же имеется возможность наладить процесс обмена данными со сторонней, уже известной нам, системой LabView. Такой набор возможностей превращает MatLab/Simulink в главный инструмент для решения широкого спектра научных и прикладных задач в таких областях, как разработка систем управления и проектирование коммуникационных систем[3]. Однако самой важной особенностью, которая значительно упрощает процесс разработки и моделирования динамических систем, является встроенная подсистема Simulink.

К несомненным достоинствам среды разработки MatLab, с точки зрения выполнения задач НИР, можно отнести наличие в этой среде базовой переменной, задающей моменты времени работы моделируемого устройства, а также явную дифференциацию средств, используемых для моделирования систем непрерывного и дискретного времени. К тому же, полученные при моделировании данные могут использоваться в среде LabView, что способствует проведению дальнейших экспериментов, связанных с

передачей модулированного сигнала по каналу связи. С учетом этих моментов выбор Mathworks MatLab/Simulink в качестве основного инструмента для моделирования и прототипирования разрабатываемой в рамках НИР системы связи представляется предпочтительным. Рассмотрим основные принципы моделирования динамических систем в среде MatLab/Simulink.

2.1. Описание выбранной среды для разработки численной модели системы связи с псевдослучайной цифровой модуляцией

Simulink – это программная среда имитационного блочного моделирования динамических систем, т.е. систем, состояние и выходные сигналы которых меняются с течением времени. Основывается на программных средствах MatLab, но позволяет создавать модели из стандартных блоков в графическом виде – принцип визуального программирования. Это дает возможность значительно упростить процесс создания модели, поиска ошибок, модификации модели другими пользователями, что в целом позволяет добиваться результатов гораздо быстрее, чем при использовании языка MatLab в чистом виде. Кроме того, для созданной модели пользователь имеет возможность автоматически сгенерировать код на языках C, VHDL, Verilog.

На начальном этапе моделирования, используя специальную библиотеку, пользователь на экране монитора с помощью готовых блоков создает в редакторе Simulink модельную диаграмму (блок-схему) исследуемой системы. От пользователя не требуется знаний языка программирования и численных методов прикладной математики. Достаточно обладать только необходимыми сведениями предметной области моделируемого процесса. Блок схема отображает временные математические зависимости между значениями входных и выходных параметров системы и ее состоянием. На следующем этапе необходимо выбрать временной

интервал работы и запустить моделирование системы, представленной диаграммой.

Графическая диаграмма модели в Simulink включает в себя набор блоков (block) соединяемых между собой сигналами (signal). Каждый блок, доступный из окна встроенной библиотеки, представляет собой некоторую элементарную систему. У блоков имеются входные и выходные порты (port) для подключения сигналов. Значения выходных портов блока зависят от текущих и, возможно, предыдущих значений переменной, которая определяет состояние блока (state) и зависит от значений входных портов.

Математическая зависимость между входными значениями, состоянием блока и выходными значениями определяется обыкновенным дифференциальным уравнением.

Предполагается, что описанная система, представляется моделью с конечным числом состояния, которая управляется некоторым независимым синхронизирующим устройством. Таким образом, все переменные системы изменяются не непрерывно, а только в некоторые дискретные моменты времени, когда приходит синхронизирующий сигнал от тактового источника. Заданный пользователем временной интервал разбивается на отдельные тактовые моменты. На каждом тактовом моменте для всех блоков системы находится численное решение уравнения, значения сигнала на выходе блока определено во все промежутки времени. От выбора временного шага (time step) зависит точность получаемого решения. В пакете Simulink предусмотрено несколько алгоритмов интегрирования (solver) для численного решения уравнений. Одни алгоритмы подстраивают величину временных интервалов под скорость изменения состояния системы (variable step solver), другие используют постоянный размер временных интервалов (fixed step solver), который задается пользователем при настройке системы.

Практически все блоки доступные из библиотеки Simulink параметризованы. Параметры каждого блока задаются в открывающемся диалоговом окне, который вызывается при двойном клике манипулятором

«мышь». В модели могут присутствовать одинаковые по функциональному назначению блоки, но с различными заданными параметрами. Так же имеется возможность использовать параметры, значения которых можно изменять непосредственно в процессе модуляции без необходимости в перекомпиляции модели.

Иногда при описании моделей систем возникает потребность в использовании блоков с функционалом не доступным при использовании стандартных библиотечных блоков. В этом случае есть возможность создания собственных блоков (custom block). Такие блоки можно создать несколькими способами. Первый способ – графическая диаграмма, соединяя между собой проводниками стандартные блоки Simulink и объединив получившуюся диаграмму в один специальный блок (subsystem), при необходимости, для этого блока можно задать параметры. Следующие способы создания custom-блока заключаются в программном описании его поведения. Для этого можно использовать Embedded MatLab Function блок, в котором применяется урезанная версия языка программирования MatLab, либо S-function с существенно более богатыми возможностями. Для упрощения процедуры построения S-function в Simulink используется S-function Builder, который позволяет автоматизировать работу по написанию нужного блока.

Имеется возможность использовать условные подсистемы, которые активируются только после выполнения заданных условий (conditionally executed subsystem). Различают virtual и atomic подсистемы, по умолчанию для всех подсистем устанавливается значение virtual, такие подсистемы используются в основном для упрощения графического представления функциональной модели. В том случае, когда подсистема определена как atomic, все уравнения этой подсистемы интегрируются единым целым. При симуляции наличие такой подсистемы может повлиять на порядок выполнения вычислений. Любой подсистеме, по требованию пользователя, разрешено изменять значение virtual на atomic.

Сигналы в Simulink используются для соединения блоков в диаграмму и отображаются в виде стрелок, направление которой позволяет отличать инициатора от исполнителя. Пользователь в процессе построения диаграммы задает атрибуты сигнала (имя сигнала, тип данных и размерность). Инициатор задает (пишет в сигнал) текущие изменения значений, а исполнитель использует их при дальнейших вычислениях.

Наблюдение за изменениями сигналов проводится с помощью виртуальных регистрирующих устройств, доступных из библиотеки. Имеется целый набор таких инструментов – от простых измерителей типа вольтметра или амперметра до многофункциональных осциллографов, которые позволяют регистрировать временные выходные значения параметров модулируемых систем. Так же можно отыскать сложные приборы такие, как анализаторы спектра сигнала и графопостроитель для создания фазовых портретов колебаний. Результаты моделирования доступны пользователю в виде графиков или таблиц.

Итак, блоки в MatLab/Simulink представляют собой обыкновенные дифференциальные уравнения. Вызовом соответствующих функций-методов блока (block methods) при моделировании производится решение этих уравнений. Вызов методов производится в процессе simulation loop (цикл симуляции), каждая итерация которого представляет состояние моделируемой системы в соответствующий момент времени.

Можно выделить три наиболее общих типа методов блоков:

- `outputs` – метод вычисляет значения выходных сигналов блока на основе значений входных сигналов в данный момент времени и состояния блока в предыдущий момент времени;
- `update` – вычисляет состояние блока дискретного времени на основе значений входных сигналов в данный момент времени и состояния блока в предыдущий момент времени;

- `derivatives` – вычисляет значение производной состояния блока (для блоков непрерывного времени) на основе значений входных сигналов в данный момент времени и состояния блока в предыдущий момент времени.

Кроме методов каждого блока в Simulink определены методы модели в целом (`model methods`). Эти методы вызываются в процессе моделирования для определения свойств и значений выходных сигналов модели в целом. Как правило, работа `model methods` заключается в вызове соответствующих методов всех блоков модели (`block methods`).

Процесс симуляции в Simulink происходит в несколько этапов. Первый из них – компиляция модели. На этом этапе производится расчет всех значений параметров блоков, заданных выражениями на языке программирования MatLab; определение атрибутов сигналов не заданных пользователем явно (`attribute propagation`) и проверка на совместимость всех атрибутов сигналов с блоками, которые их принимают; замещение всех виртуальных подсистем блоками, которые составляют их содержимое (`model hierarchy flattening`); определение порядка интегрирования уравнений блоков в модели (при этом создается упорядоченный список блоков – `blocks sorted list`); определение величины временного шага (`time step`) для блоков, у которых эта величина не задана явно (`time step propagation`). В результате компиляции по графической диаграмме модели создается исполняемый файл модели (`executable form`).

Следующий этап – этап, называемый `linking`. На этом этапе Simulink захватывает (аллоцирует) и инициализирует память, необходимую для хранения значений сигналов и состояний блоков. На этом же этапе на основе `blocks sorted list` определяется наиболее эффективный порядок вызовов методов блоков модели (создается `method execution list`). Пользователь при создании модели может влиять на порядок методов в `method execution list`, задавая приоритет того или иного блока. Методы блоков с более высоким приоритетом вызываются раньше.

Заключительный этап симуляции модели называется *simulation loop*. Он, в свою очередь, делится на две фазы: *loop initialization phase* и *loop iteration phase*. В первой фазе вычисляются начальные значения выходных сигналов и состояния модели. Эти вычисления выполняются один раз в момент запуска симуляции. Фаза итераций повторяется итеративно для каждого временного интервала, начиная с момента времени, заданного пользователем как начальный, и до момента окончания симуляции. На каждом шаге итеративной фазы рассчитываются новые значения входных сигналов, состояния и выходных сигналов моделируемой системы.

2. Разработка алгоритмов работы модулятора и демодулятора, использующих в качестве модулируемого сигнала цифровую псевдослучайную последовательность

2.1. Квадратурная фазовая манипуляция сигналов (QPSK)

При цифровой фазовой модуляции M возможных состояний модулированного сигнала можно представить в виде:

$$\begin{aligned} s_m(t) &= \operatorname{Re} \left\{ g(t) e^{i2\pi(m-1)/M} e^{i2\pi f_c t} \right\} = \\ &= g(t) \cos(2\pi f_c t + 2\pi \frac{m-1}{M}) = \\ &= g(t) \cos \frac{2\pi(m-1)}{M} \cos 2\pi f_c t - g(t) \sin \frac{2\pi(m-1)}{M} \sin(2\pi f_c t), \quad (1) \\ &t \in [0, T], \end{aligned}$$

где $g(t)$ определяет огибающую сигнала, а $\theta_m = \frac{2\pi(m-1)}{M}$, $m = 1, 2, \dots, M$ определяет M возможных состояний фазы несущего колебания, которая переносит информационное сообщение. Цифровую фазовую модуляцию называют также модуляцией с фазовым сдвигом (*Phase Shift Keying, PSK*).

Все сигналы $s_m(t)$ имеют одинаковую энергию:

$$E = \int_0^T s_m^2(t) dt = \frac{1}{2} \int_0^T g^2(t) dt = \frac{1}{2} E_g ,$$

где E_g – энергия импульса $g(t)$.

Сигналы с PSK модуляцией можно представить как линейную комбинацию двух ортонормированных сигналов $f_1(t)$ и $f_2(t)$:

$$s_m(t) = s_{m1}(t)f_1(t) + s_{m2}(t)f_2(t),$$

где

$$f_1(t) = \sqrt{\frac{2}{E_g}} g(t) \cos 2\pi f_c t,$$

$$f_2(t) = -\sqrt{\frac{2}{E_g}} g(t) \sin 2\pi f_c t,$$

а координаты двумерного вектора $\vec{s}_m = [s_{m1}, s_{m2}]$ определяются выражением:

$$\vec{s}_m = \left[\sqrt{\frac{E_g}{2}} \cos \frac{2\pi(m-1)}{M}, \sqrt{\frac{E_g}{2}} \sin \frac{2\pi(m-1)}{M} \right], m = 1, 2, \dots, M.$$

Выражение для полосового сигнала с QPSK модуляцией можно получить, положив в (1) $M=4$ и добавив начальный сдвиг фазы $\frac{\pi}{4}$ модулирующим сигналам:

$$\begin{aligned} s_m(t) = & g(t) \cos \left(\frac{\pi(m-1)}{2} + \frac{\pi}{4} \right) \cos 2\pi f_c t - \\ & - g(t) \sin \left(\frac{\pi(m-1)}{2} + \frac{\pi}{4} \right) \sin(2\pi f_c t), \end{aligned} \quad (2)$$

$$t \in [0, T], m = 1, 2, 3, 4.$$

В системах QPSK модулированный сигнал имеет 4 различных состояния. Эти состояния формируются специальной схемой преобразования последовательных дибитов (пар битов) в символы. Соответствующие состояния сохраняются в течение символьного интервала T , который в два раза длиннее битового интервала T_b , т.е. $T = 2T_b$. Четыре возможных дибита

чаще всего преобразуются в соответствии с кодом Грея. При таком кодировании соседние состояния сигнала различаются значением только одного бита. Код Грея, используемый при QPSK модуляции, показан на сигнальном созвездии серыми цифрами (рисунок 1).

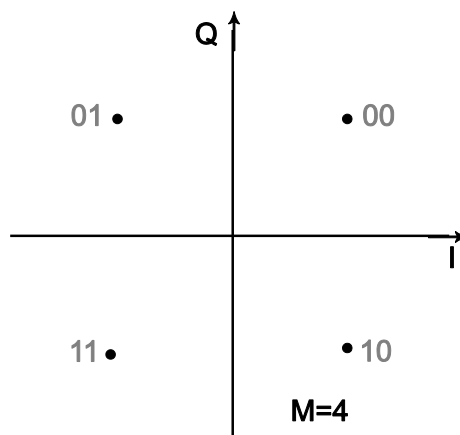


Рисунок 1 – Сигнальное созвездие при QPSK модуляции

Формирование QPSK сигнала производится обычно в соответствии с выражением (2). Битовый поток цифрового сообщения разделяется на два отдельных потока. Один поток $I(t)$ – синфазный, а другой $Q(t)$ – квадратурный. Каждый из этих потоков имеет символьную скорость в два раза меньшую скорости передачи информации. Потоки I и Q порознь подаются на перемножители. На второй вход умножителя канала I подается сигнал несущей $\cos 2\pi f_c t$, а на второй вход умножителя канала Q – квадратурная несущая, т.е. $\sin 2\pi f_c t$. Выходными сигналами обоих перемножителей являются сигналы BPSK. Выходной сигнал перемножителя I имеет фазу 0 или π относительно несущей, а перемножителя Q – $\frac{\pi}{2}$ или $\frac{3\pi}{2}$ относительно несущей. Затем выходные сигналы суммируются для получения четырехфазного сигнала. Таким образом, QPSK система может рассматриваться как две BPSK системы работающие в квадратуре.

При демодуляции, поскольку составляющие QPSK сигнала I и Q находятся в квадратуре (ортогональны), приемник может демодулировать их независимо друг от друга, работая фактически как два приемника BPSK

сигналов. Восстановленные последовательности I и Q затем объединяются для восстановления исходной последовательности данных. На рисунке 2 приведена структурная схема QPSK модулятора.

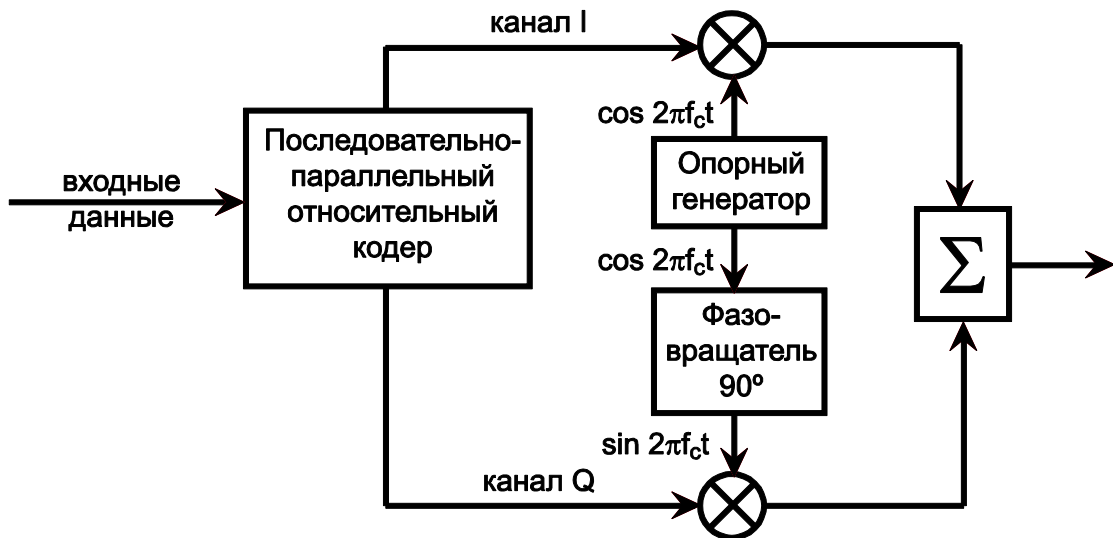


Рисунок 2 – Структурная схема QPSK модулятора

На рисунках 3-8 приведены временные диаграммы потока данных исходного информационного сообщения «111000011100», видеопотоков I и Q , результат модуляции в каналах I и Q и, наконец, результирующий полосовой QPSK сигнал.

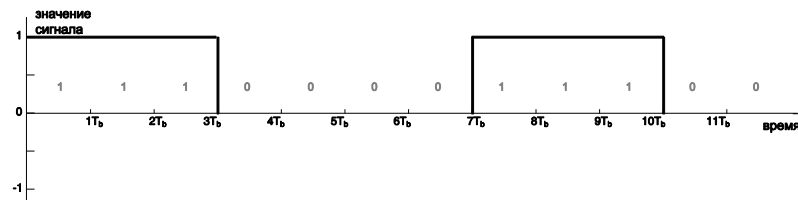


Рисунок 3 – Временная диаграмма информационного цифрового сигнала

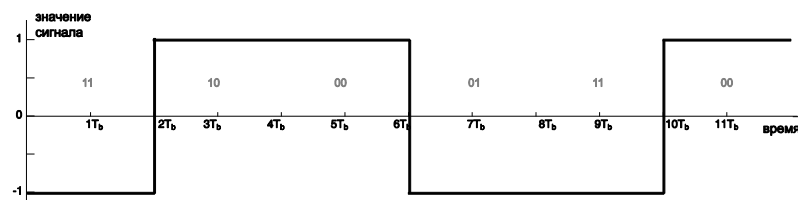


Рисунок 4 – Временная диаграмма модулирующего сигнала в синфазном канале I

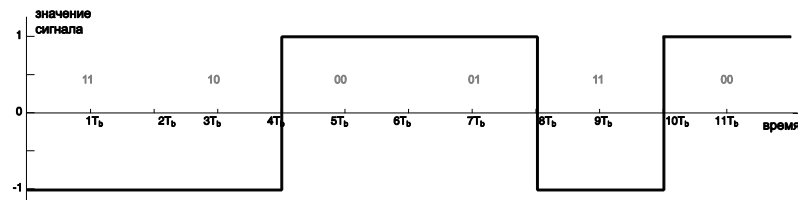


Рисунок 5 – Временная диаграмма модулирующего сигнала в квадратурном канале Q

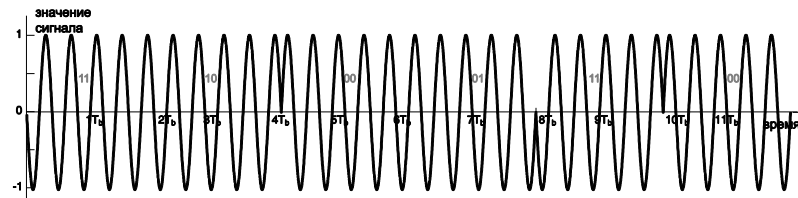


Рисунок 6 – Результат модуляции в синфазном канале I

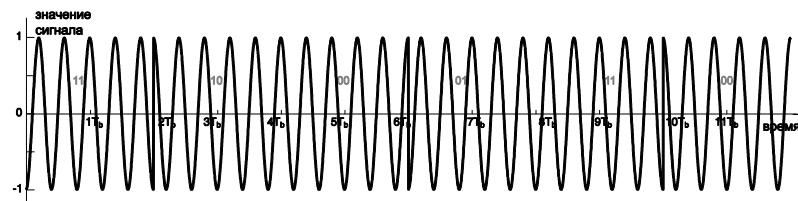


Рисунок 7 – Результат модуляции в квадратурном канале Q

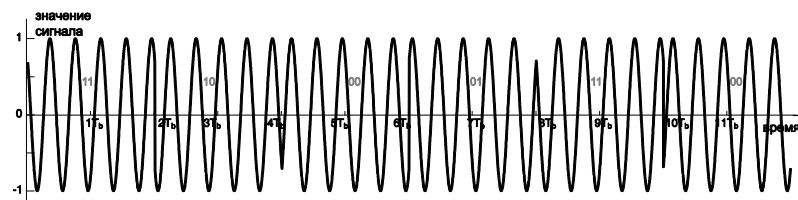


Рисунок 8 – Результирующий полосовой сигнал QPSK, нормированный по амплитуде на 1

В схеме восстановления несущей для QPSK сигналов используется возведение принятого сигнала в четвертую степень. Неоднозначность фазы восстановленной несущей, также как и при BPSK модуляции, успешно снимается относительным кодированием.

2.3. Алгоритмы работы модулятора и демодулятора псевдослучайной цифровой последовательности

В основе разрабатываемой системы связи лежат стандартные методы цифровой модуляции и демодуляции сигналов QPSK. Входная

последовательность 8-разрядных отсчетов информационного сообщения в модулирующей части системы должны разбиваться на пары битов (дибиты). Значение каждого дибита соответствует одной из точек сигнального созвездия QPSK, как это иллюстрируется на рисунке 1. Вместо генератора гармонических колебаний ($\cos 2\pi f_c t$ и $\sin 2\pi f_c t$) в разрабатываемой системе предлагается использовать генератор псевдослучайных цифровых последовательностей. Случайные отсчеты генерируемых последовательностей некоррелированы и равномерно распределены на интервале $[-1, 1]$. Если обозначить за $\xi(t)$ и $\eta(t)$ генерируемые последовательности, а за $I(t)$ и $Q(t)$ последовательность координат точек сигнального QPSK-созвездия, то результат модуляции можно представить как результат произведения:

$$s(t) = \{I(t) + iQ(t)\} \cdot \{\xi(t) + i\eta(t)\}.$$

Для демодуляции такого шумоподобного сигнала необходимо провести когерентную обработку. Пусть в демодуляторе имеются отсчеты сгенерированных псевдослучайных последовательностей $\xi(t)$ и $\eta(t)$. Тогда процедура детектирования сигнального сообщения может быть представлена в виде двух этапов. На первом этапе принятый сигнал $s(t)$ умножается на отсчеты комплексно-сопряженного псевдослучайного сигнала $\xi(t) - i\eta(t)$. Результат умножения усредняется на временном интервале, равном символьному интервалу QPSK-модуляции T_s . Легко получить, что результат усреднения совпадает со значениями комплексного сигнала $I(t) + iQ(t)$. Действительно:

$$m(t) = \langle s(t) \cdot (\xi(t) - i\eta(t)) \rangle = \{I(t) + iQ(t)\} \cdot \left\{ \langle \xi^2(t) \rangle + \langle \eta^2(t) \rangle \right\},$$

где за $\langle \dots \rangle$ обозначена операция усреднения сигнала на символьном интервале T_s . Знаки (больше или меньше нуля) вещественной и мнимой части сигнала $m(t)$, таким образом, полностью определяется знаками

вещественной и мнимой частей сигнала $I(t) + iQ(t)$, что позволяет однозначно восстановить координаты точек сигнального созвездия. На втором этапе необходимо по каждой детектированной точке сигнального созвездия восстановить значение соответствующего дибита. Дибиты объединить в байты двоичного представления значений информационного (передаваемого) сообщения.

Для практической реализации этих простых методов модуляции и демодуляции псевдослучайных последовательностей необходимо решить две задачи. Первая из них связана с необходимостью передавать комплексные значения модулированного сигнала по каналу связи. В случае использования радиоканала, когда на завершающем этапе модуляции спектр псевдослучайного сигнала переносится на несущую частоту f_c путем гетеродинирования, эта задача решается автоматически. вещественная часть сигнала умножается при гетеродинировании на синфазную составляющую несущего колебания $\cos 2\pi f_c t$, а мнимая – на квадратурную составляющую $\sin 2\pi f_c t$. В канал в результате подается суммарный сигнал, содержащий синфазную и квадратурную составляющие. Взаимная ортогональность $\cos 2\pi f_c t$ и $\sin 2\pi f_c t$ позволяет в приемном тракте на этапе гетеродинирования (то есть при умножении принятого сигнала на $\cos 2\pi f_c t$ и $\sin 2\pi f_c t$ с последующей фильтрацией фильтром низких частот) выделить из суммарного сигнала вещественную и мнимую части псевдослучайного сигнала.

В случае передачи псевдослучайного сигнала по низкочастотному каналу (проводному) решение первой задачи также очевидно. Для ее решения просто нужно чередовать во времени передачу значений вещественной и мнимой частей комплексного псевдослучайного сигнала. Так как случайные отсчеты последовательностей $\xi(t)$ и $\eta(t)$ взаимно некоррелированы, то в приемном тракте необходимо все, например, четные отсчеты коррелировать

со значениями $\xi(t)$ и их же коррелировать со значениями $\eta(t)$. Максимум корреляции однозначно укажет на то, являются ли четные отсчеты принимаемого сигнала значениями вещественной части комплексного сигнала или мнимой.

Вторая задача имеет не такое однозначное решение. Для демодуляции псевдослучайного сигнала на приемной стороне системы связи необходимо иметь отсчеты случайных последовательностей $\xi(t)$ и $\eta(t)$, совпадающие во времени с теми случайными значениями, которые содержатся в этот момент в модулированном сигнале. Таким образом, вторая задача является задачей синхронизации генераторов псевдослучайных последовательностей на приемной и передающей сторонах системы связи.

2.4. Разработка методов и алгоритмов синхронизации приемного и передающего трактов, обеспечивающих возможность когерентной обработки сигнала при его демодуляции

Для синхронизации генераторов псевдослучайных последовательностей $\xi(t)$ и $\eta(t)$ на передающей и приемной стороне разрабатываемой системы связи предлагается использовать параллельную дополнительную передачу псевдослучайного комплексного сигнала, содержащего в качестве информационного заранее заданное сигнальное сообщение. Передающая и приемная сторона имеет идентичные ветви, осуществляющие детектирование сигнального сообщения. В момент времени, когда прием сигнального сообщения завершен, на обеих сторонах системы связи производится перезапуск генераторов псевдослучайных последовательностей $\xi(t)$ и $\eta(t)$, что и обеспечивает синхронность работы модулятора и демодулятора.

Рассмотрим предлагаемый метод более детально. Обозначим за $y(t)$ значения битов сигнального сообщения. Эти значения задаются заранее и известны как на приемной стороне, так и на передающей. В отдельной ветви модулятора на передающей стороне системы связи формируется

комплексный сигнал $s_1(t)$, значения которого получаются в результате умножения предварительно центрированных значений $y(t)$ на вещественную часть комплексных значений псевдослучайной последовательности $\zeta(t) + i\zeta(t - \Delta t)$. Мнимая часть этой последовательности является задержанной во времени копией ее вещественной части. Последовательность $\zeta(t)$ является белым шумом (δ -коррелирована) статистически независимой от последовательностей $\xi(t)$ и $\eta(t)$. Величина задержки Δt известна на приемной и передающей стороне и является параметром системы связи. Таким образом, в отдельной ветви модулятора формируется дополнительный сигнал $s_1(t)$:

$$s_1(t) = y(t)\zeta(t) + i\zeta(t - \Delta t).$$

Этот сигнал добавляется к результату модуляции $s(t)$. Суммарный сигнал $s(t) + s_1(t)$ подается в канал связи. В то же время, сигнал $s_1(t)$ подается на вход демодулятора сигнального сообщения. В этом демодуляторе вещественная часть сигнала $s_1(t)$ задерживается на время Δt . Выполнение в демодуляторе взаимной корреляции задержанной вещественной части $s_1(t)$ и его мнимой части позволяет однозначно определить знак (больше или меньше нуля) центрированной сигнальной последовательности:

$$\langle y(t - \Delta t)\zeta(t - \Delta t) \cdot \zeta(t - \Delta t) \rangle = y(t - \Delta t) \langle \zeta^2(t - \Delta t) \rangle.$$

По окончании детектирования сигнального сообщения в модуляторе производится перезапуск генераторов псевдослучайных последовательностей $\xi(t)$ и $\eta(t)$.

Аналогичная ветвь демодулятора сигнального сообщения в приемной части системы выделяет из суммарного принимаемого сигнала $s(t) + s_1(t)$ сигнальное сообщение. По окончании приема сигнального сообщения производится перезапуск генераторов псевдослучайных последовательностей

$\xi(t)$ и $\eta(t)$ на принятой стороне системы связи, что и обеспечивает синхронизацию работы модулятора и демодулятора.

Система связи с псевдослучайной цифровой модуляцией

В предыдущих параграфах были представлены свойства и способы генерации псевдослучайных последовательностей и основным достоинством, которое относится к устройствам, использующим в качестве модулированного сигнала отсчеты случайных последовательностей, является высокая помехозащищенность таких систем связи. Однако еще одним немаловажным достоинством является возможность организовать одновременную работу большого числа абонентов в общей полосе частот, без взаимного влияния абонентов друг на друга. Это достигается за счет свойств корреляционной функции, которая равна корреляционному моменту при совпадении двух случайных величин и равна нулю в противном случае. Каждому абоненту соответствует псевдослучайная последовательность с отличным распределением, поэтому при вычислении корреляции влияние других абонентов отсутствует.

При создании модели системы связи было принято решение использовать квадратурную фазовую модуляцию (QPSK, от англ. Quadrature Phase Shift Keying) для псевдослучайной последовательности. Потому как такой способ модуляции является базовым и широко используется при создании современных цифровых телекоммуникационных устройств, то применение его в качестве функционального блока позволяет организовать эффективное и достаточно простое устройство. Основным оценочным фактором при создании системы связи является простота алгоритмов, используемых для реализации разработанных решений. Создание портативного устройства работающего в широкой полосе частот и при этом недорогого в плане реализации должно привлекать внимание потребителя.

Основной проблемой в плане практической реализации устройств подобного класса является проблема синхронизации передающего и приемного устройств. На настоящее время предложено достаточное количество возможных решений этой проблемы, но их эффективность ограничена за счет сложных схем организации процесса синхронизации. Многокаскадные устройства с возможностью слежения за состоянием синхронизации значительно увеличивают ресурсоемкость схем при создании готового устройства [4]. В настоящей работе синхронизация достигается за счет добавления к результату квадратурной фазовой модуляции (QPSK) псевдослучайной последовательности информационным сообщением, результат двоичной фазовой модуляции (BPSK от англ. Binary Phase Shift Keying) другой случайной последовательности заранее известными значениями некоторой управляющей последовательности. В результате суммирования двух таких шумоподобных сигнала они не оказывают влияния друг на друга и могут безошибочно детектироваться в приемном тракте.

Предложенные решения были реализованы, в процессе выполнения магистерской работы, и в результате разработана программная модель для среды MatLab/Simulink. Модель демонстрирует работоспособность системы связи с псевдослучайной цифровой модуляцией.

Функциональная схема передающего устройства

Функциональная схема передающей части системы представлена на рис. 4.1. Последовательность битов информационного сообщения поступает на вход блока 1, в котором каждая пара битов отображается в одну из точек QPSK-созвездия (QPSK, от англ. Quadrature Phase Shift Keying). Полученные комплексные значения $I + iQ$ умножаются на комплексные отсчеты $\xi + i\eta$ псевдослучайной последовательности, генерируемой в блоке 2. Псевдослучайные отсчеты ξ и η являются отсчетами белого гауссового шума с нулевым средним и дисперсией σ^2 . Отсчеты вещественной и мнимой

части комплексного шума некоррелированы. Если обозначить за T_b временной интервал, определяющий скорость поступления битов информационного сообщения в блок 1, то время T_s , за которое происходит изменение значения комплексного сигнала $I + iQ$, составляет $T_s = 2T_b$. Временной интервал T_n , на котором остаются неизменными комплексные случайные значения $\xi + i\eta$, в несколько десятков раз меньше символьного интервала T_s .

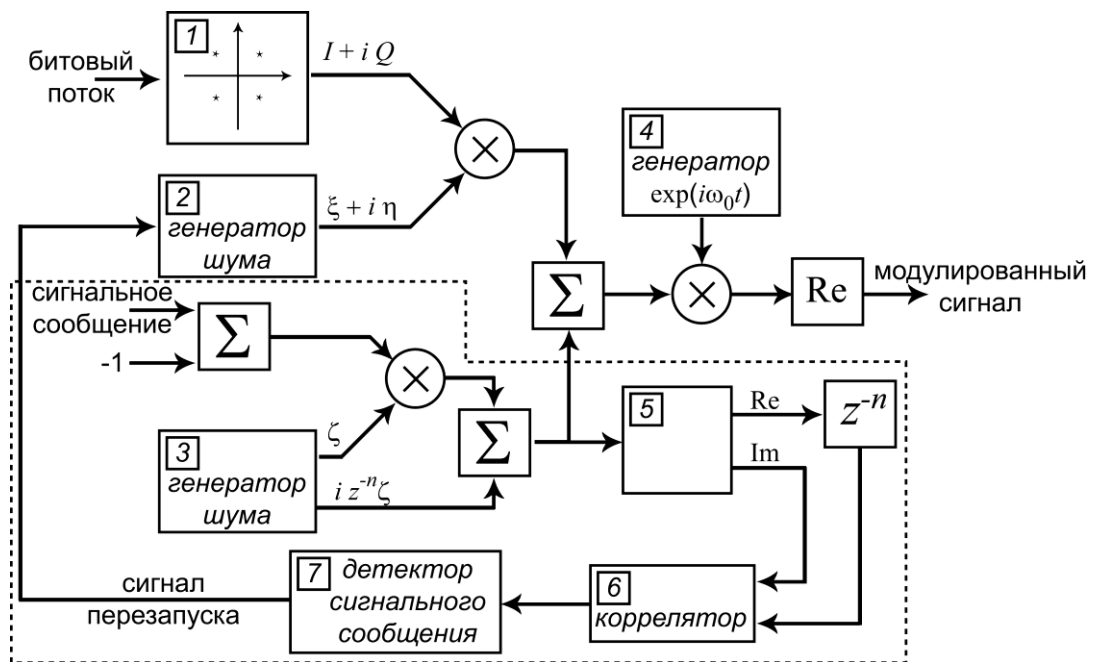


Рис. 4.1. Функциональная схема передающей системы с псевдослучайной цифровой модуляцией

Блоки, представленные в нижней части функциональной схемы и обведенные пунктирной линией, предназначены для передачи сигнального сообщения, обеспечивающего синхронизацию приемного и передающего трактов. Последовательность заранее заданных значений битов сигнального сообщения переводится в биполярную форму, после чего умножается на псевдослучайные отсчеты ζ белого гауссового шума с нулевым средним и дисперсией σ^2 , генерируемого в блоке 3. Скорость передачи битов сигнального сообщения совпадает со скоростью смены модуляционных символов в блоке 1 и определяется временным интервалом T_s . Скорость

генерации отсчетов ζ задается временным интервалом T_n . На выходе сумматора в нижней части схемы формируется комплексный сигнал, вещественная часть которого представляет собой результат модуляции сигнальным сообщением псевдослучайного шума ζ , а мнимая – немодулированные отсчеты ζ , задержанные на n временных интервалов T_n . Величина задержки n является параметром системы связи. Этот сигнал добавляется к результату модуляции псевдослучайной комплексной последовательности $\xi + i\eta$ модуляционными символами $I + iQ$. Результирующая псевдослучайная последовательность переносится в область высоких частот путем умножения на комплексное колебание с частотой ω_0 . Вещественная часть, сформированного таким образом сигнала является результатом модуляции.

Сформированный в нижней части схемы комплексный сигнал, содержащий сигнальное сообщение, разделяется в блоке 5 на вещественную и мнимую части. Вещественная часть задерживается на n временных интервалов T_n и вместе с мнимой частью подается на вход блока 6, вычисляющего взаимную корреляцию входных сигналов на временном интервале T_s . Знак сигнала на выходе коррелятора полностью определяется значениями битов сигнального сообщения. В блоке 7 производится накопление детектированных битов сигнального сообщения. В момент времени, когда детектируется последний бит сигнального сообщения, блок 7 генерирует сигнал перезапуска генераторов псевдослучайных последовательностей ξ и η .

Функциональная схема приемного устройства

Функциональная схема приемной части системы связи представлена на рис. 4.2. Модулированный высокочастотный сигнал с несущей частотой ω_0 умножением на синфазную и квадратурную составляющие несущего колебания и фильтрацией фильтрами нижних частот (блоки 2 и 3 на схеме)

переносится на нулевую частоту. Синфазная компонента задерживается на n временных интервалов T_n и совместно с квадратурной компонентой поступает на вход блока 4. В этом блоке вычисляется взаимная корреляция входных сигналов на временном интервале T_s . В силу взаимной некоррелированности отсчетов псевдослучайной последовательности ζ с отсчетами последовательностей ξ и η знак сигнала на выходе коррелятора 4 полностью определяется значениями бит сигнального сообщения. Значения бит сигнального сообщения накапливаются в блоке 5, который по приему последнего бита сигнального сообщения генерирует сигнал перезапуска генераторов псевдослучайных последовательностей ξ и η в блоке 6.

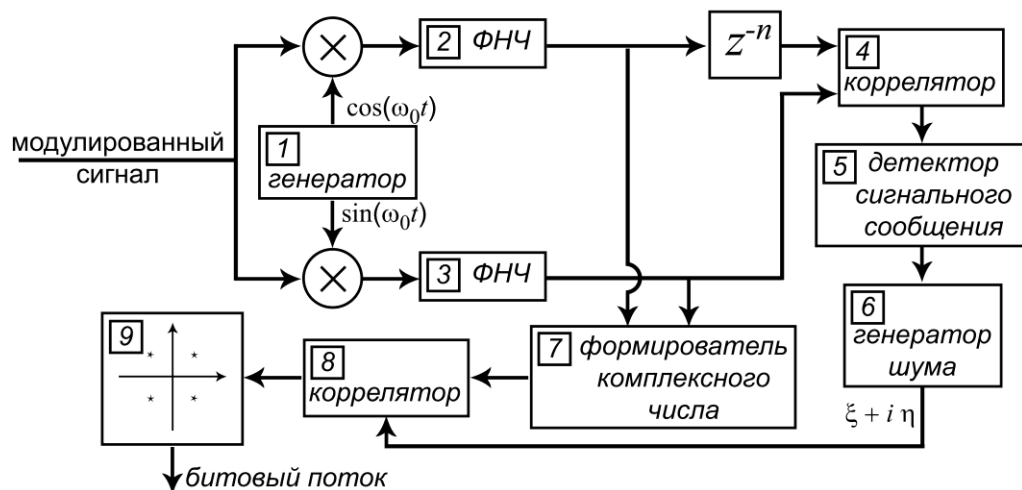


Рис. 4.2. Функциональная схема приемной системы

В блоке 7 из последовательности значений синфазной и квадратурной составляющих на выходах фильтров низких частот формируется комплексный сигнал, подающийся на вход коррелятора 8. На второй вход блока 8 поступает комплексный сигнал $\xi + i\eta$, генерируемый в блоке 6. В блоке 8 производится расчет взаимной корреляции последовательности отсчетов входных комплексных сигналов на временном интервале равном T_s . Знак вещественной и мнимой части отсчетов сигнала на выходе коррелятора полностью определяется значениями сигнала $I + iQ$, которыми модулировался псевдослучайный комплексный сигнал. В блоке 9

производится отображение точек созвездия QPSK в значения дибитов информационного сообщения.

Численная модель рассмотренной приемо-передающей системы была реализована в среде для моделирования динамических систем Mathworks MatLab\Simulink. При моделировании использовались следующие параметры системы. Дисперсия гауссовых псевдослучайных последовательностей ξ , η и ζ устанавливалась равной $\sigma^2 = 1$. Задержка n при формировании псевдослучайного комплексного сигнала, содержащего сигнальное сообщение, была равна $n = 10T_n$. Символьный временной интервал был равен $T_s = 64T_n$. Кроме того, между моделями передающего и приемного трактов на пути модулированного сигнала вставлялась задержка, имитирующая задержку сигнала в канале связи. Эта задержка обеспечивала начальную асинхронность псевдослучайных значений ξ и η в модуляторе и демодуляторе.

На рис. 4.3 представлен пример осциллограммы, полученной при моделировании системы связи. Осциллограмма 1 представляет развертку во времени значений информационного цифрового сигнала – последовательность восьмиразрядных целых чисел. Осциллограмма 2 – развертка сигнала в синфазном канале приемного тракта на выходе фильтра нижних частот. Как и следовало ожидать, этот сигнал представляет собой белый гауссов шум. Временная развертка значений вещественной и мнимой частей сигнала на выходе блока 8 в приемном тракте представлена осциллограммами 3 и 4 соответственно. На осциллограмме 5 приведена развертка детектированного информационного сигнала.

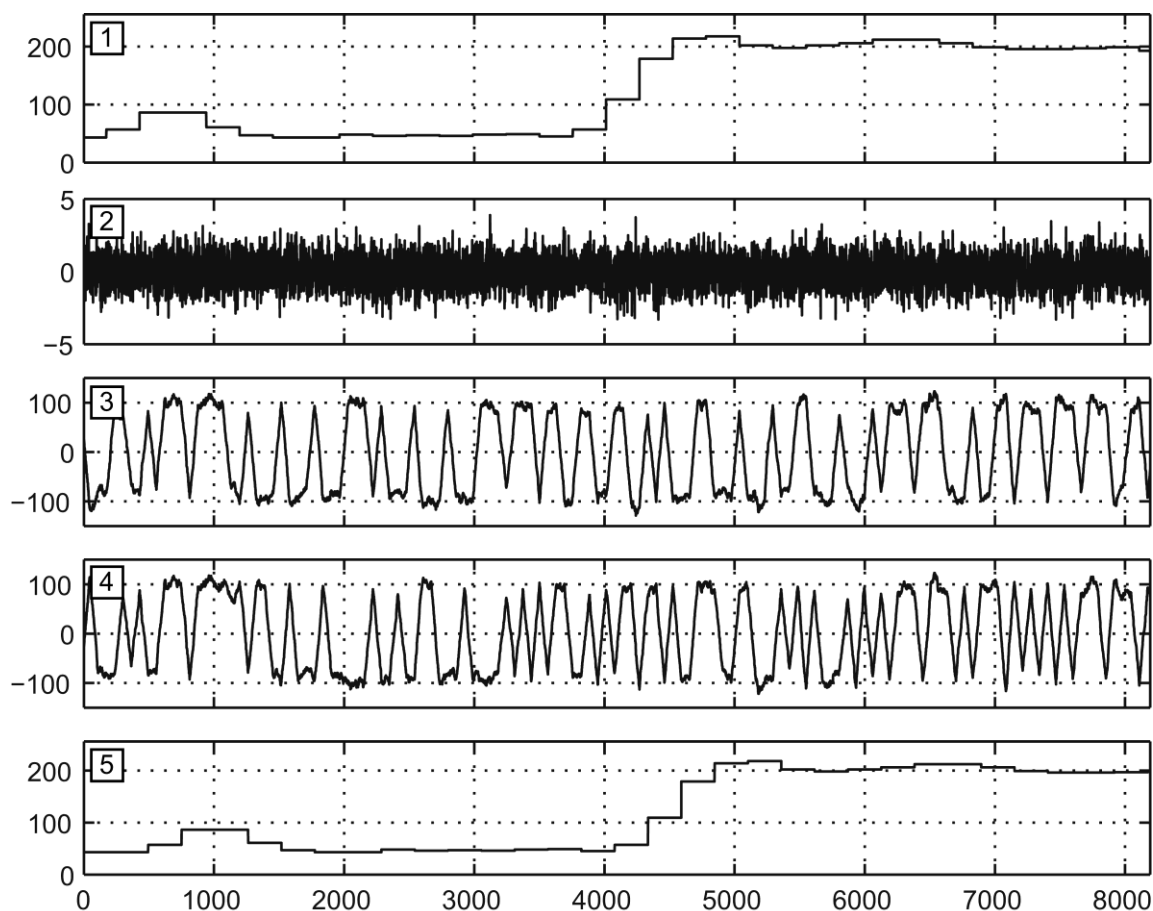


Рис. 4.3. Пример осциллограммы, полученной при моделировании системы связи

Полученные при моделировании осциллограммы полностью подтверждают работоспособность предложенной схемы системы связи с псевдослучайной цифровой модуляцией. Несмотря на начальную рассинхронизацию генераторов псевдослучайных цифровых последовательностей в приемном и передающем трактах, после передачи и приема первого сигнального сообщения происходит перезапуск этих генераторов, что обеспечивает успешную демодуляцию сигнала. Это демонстрируется осциллограммами 1 и 5, на которых сигналы совпадают с точностью до временной задержки. Осциллограммы 2, 3, 4 демонстрируют вполне ожидаемый эффект усиления сигнала при корреляционной обработке. Действительно, если амплитуда псевдослучайного модулированного сигнала на осциллограмме 2 не превышает по абсолютной величине значения 4, то на осциллограммах 3 и 4, демонстрирующих временную развертку сигнала на выходе коррелятора, значения колеблются в диапазоне от -100 до 100.

Коэффициент усиления полностью определяется величиной отношения $\frac{T_s}{T_n}$ и

может меняться в широких пределах при задании параметров системы связи.

По результатам проделанной работы были сформулированы следующие научные положения:

1. В системе связи с цифровой псевдослучайной модуляцией отношение сигнал/шум на выходе коррелятора в приемном тракте определяется отношением длительности модуляционного символа к масштабу корреляции псевдослучайного модулирующего цифрового сигнала и, как следствие, обратно пропорционально скорости передачи информации, что позволяет варьировать помехоустойчивость такой системы связи в широких пределах.
2. Синхронизация приемного и передающего устройств в системе связи с псевдослучайной цифровой модуляцией возможна за счет взаимной некоррелированности разных псевдослучайных последовательностей, что позволяет реализовать одновременную передачу по каналу связи сигнального (синхронизирующего) и информационного сообщений, без взаимного влияния.

Заключение

Проведен анализ существующих способов цифровой модуляции сигналов. В качестве основы для реализации разрабатываемой системы связи предложено использовать QPSK (от англ. Quadrature Phase Shift Keying) модуляцию. Разработана численная модель QPSK-модулятора и демодулятора в среде моделирования динамических систем MatLab/Simulink.

Предложена и реализована синхронизирующая система с BPSK (англ. Binary Phase Shift Keying) модуляцией, основная идея заключается в передаче по каналу связи, одновременно, информационного и управляющего сообщений. Управляющий сигнал, представляет собой некоторую заранее известную последовательность чисел. После детектирования всех членов этой последовательности в приемном и передающем устройствах генерируется сигнал перезапуска источника псевдослучайной последовательности.

Для восстановления принимаемого сообщения используется корреляционная обработка. Знак вещественной и мнимой части отсчетов сигнала на выходе коррелятора полностью определяется значениями, которыми модулировался псевдослучайный комплексный сигнал.

По результатам численного эксперимента в среде MatLab/Simulink получены осциллограммы, которые полностью подтверждают работоспособность разработанной системы связи.

Список литературы

1. Прокис Дж. Цифровая связь. М.: Радио и связь, 2000. – 800 с.
2. Варакин Л.Е. Система связи с шумоподобными сигналами. – М.: Радио и связь, 1985. – 394 с., ил.
3. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 288 с., ил. (Серия проектирование).