Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники

Кологривов В. А.
Ефремова А. А.

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ LFM_QPSK

Методические указания по лабораторной работе в среде функционального моделирования Simulink системы MatLab для студентов радиотехнических специальностей

Томск 2022

УДК 621.396.61+621.376.3
ББК 32.811.7
К 61

Рецензент:

Мещеряков А.А., доцент кафедры радиотехнических систем ТУСУР, канд. техн. наук

Кологривов В. А., Ефремова А. А.

К 61 Имитационная модель передачи данных на основе технологии LFM_QPSK: методические указания по лабораторной работе для студентов радиотехнических специальностей / Кологривов В. А., Ефремова А. А. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2022 – 26 с.

Настоящие методические указания по лабораторной работе составлены с учетом требований федерального государственного образовательного стандарта высшего образования (ФГОС ВО).

Лабораторная работа «Имитационная модель передачи данных на основе технологии ***LFM_QPSK***» посвящена модельному исследованию ***LFM_QPSK***-модема с использованием пакета функционального моделирования ***Simulink*** системы для инженерных и научных расчетов ***MatLab***.

Работа “Имитационная модель передачи данных на основе технологии ***LFM_QPSK***” относится к циклу лабораторных работ по разделу “Модуляция/Демодуляция”, входящему в дисциплины радиотехнических специальностей.

В описании сформулирована цель лабораторной работы, приведены краткие теоретические сведения о ***LFM*** и ***PSK***-модуляции, ***LFM_MPSK*** технологии, краткая характеристика пакета Simulink системы ***MatLab***, описание виртуального лабораторного макета и используемых блоков библиотеки ***Simulink***, а также требования к модельному исследованию и контрольные вопросы, ответы на которые необходимы для успешной защиты лабораторной работы.

Одобрено на заседании каф. РТС протокол № 4 от 27.11.22

УДК 621.396.61→621.376.3
ББК 32.811.7

ОГЛАВЛЕНИЕ

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ 4
1.1 Теоретические сведения о *LFM*-модуляции 4
1.2 Теоретические сведения о *QPSK*-модуляции 5
1.3 Кратко о технологии *LFM_MPSK* 6
2 КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ *SIM*-МОДЕЛИ LFM_*QPSK*-МОДЕМА 8
3 ПРИНЦИП РАБОТЫ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ *SIM*-МОДЕЛИ *LFM_QPSK*-МОДЕМА 13
4 КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ПАКЕТА SIMULINK И ИСПОЛЬЗУЕМЫХ БЛОКОВ 19
4.1 Запуск и работа с пакетом *Simulink* 19
4.2 Описание используемых блоков библиотеки *Simulink* 20
5 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ 24
6 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ 25
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ 26

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Цель работы: разработка модели и сравнительное исследование с точки зрения помехоустойчивости и спектральной эффективности модема, реализованного на основе технологии ***LFM_QPSK*** с использованием пакета функционального моделирования ***Simulink***.

В теоретической части кратко представлен материал о ***LFM***-модуляции, ***QPSK*** манипуляции и технологии ***LFM_QPSK*** [1-5].

1.1 Теоретические сведения о *LFM*-модуляции

Линейная частотная модуляция (ЛЧМ) (***LFM***) – это вид частотной модуляции, в котором частота несущего сигнала изменяется по линейному закону.

На рисунке 1.1 представлен закон изменения частоты ***LFM*** радиоимпульса.

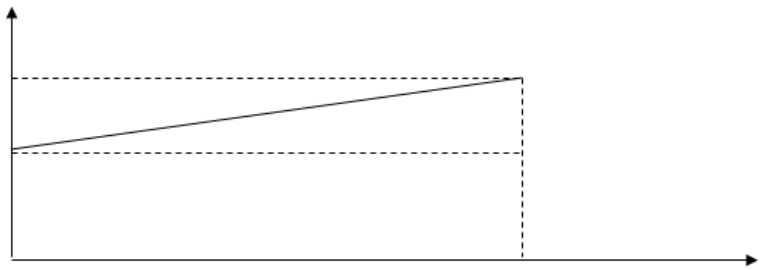


Рисунок 1.1 – Закон изменения частоты ***LFM*** радиоимпульса

LFM-сигналы применяются в радиолокации, как способ формирования и обработки радиоимпульсов, их применение позволяет повысить точность измерений.

Представим описание ***LFM*** в математическом виде:

Изменение частоты $\boldsymbol{f(t)}$ внутри импульсов с ***LFM*** происходит по линейному закону.

$$\boldsymbol{f(t) = f_0 + bt}, \quad -\frac{T_c}{2} \le t \le \frac{T_c}{2},$$

где $\boldsymbol{f_0 = \frac{F_{max}+F_{min}}{2}}$ – центральное значение несущей частоты;

$\boldsymbol{b = \frac{F_{max}-F_{min}}{T_c}}$ – крутизна изменения частоты ***LFM*** -сигнала;

$\boldsymbol{T_c}$ – длительность сигнала;

$\boldsymbol{F_{max}}$, $\boldsymbol{F_{min}}$ – максимальное и минимальное значение частоты радиосигнала.

Фаза сигнала с линейной частотной модуляцией:

$$\boldsymbol{\varphi(t) = 2\pi \int_0^t f(t)dt = 2\pi(f_0 t + \frac{b}{2}t^2)}.$$

Следовательно, ***LFM*** сигнал можно представить в виде:

$$\boldsymbol{S_{LFM}(t) = S_0 \cos\{\varphi_0 + \varphi(t)\} = S_0 \cos\left\{\varphi_0 + 2\pi(f_0 t + \frac{b}{2}t^2)\right\}},$$

где $\boldsymbol{S_0}$ – амплитуда сигнала;

$\boldsymbol{\varphi_0}$ – начальная фаза.

1.2 Теоретические сведения о *QPSK*-модуляции

Квадратурная фазовая манипуляция (***QPSK***) – вид фазовой модуляции, в котором два информационных бита, объединенных в один символ, модулируются одновременно, выбирая одно из четырех возможных состояний фазового сдвига несущей.

Сигнал ***QPSK*** в пределах длительности символа $\boldsymbol{T_{sym}}$ можно найти по формуле:

$$\mathbf{s(t) = A\cos[2\pi f_c t + \theta_n],\ 0 \le t \le T_{sym},\ n = 1,2,3,4,} \qquad (1.1)$$

где $\boldsymbol{\theta_n = (2n-1)\frac{\pi}{4}}$ – фаза сигнала.

Соотношение между сдвигом фазы модулированного колебания из множества $\{\pm\frac{\pi}{4}, \frac{3\pi}{4}, \frac{5\pi}{4}, \frac{7\pi}{4}\}$ и множеством дибитов цифрового сообщения $\{\mathbf{00, 01, 10, 11}\}$ отображается сигнальным созвездием, представленным на рисунке 1.2. Стрелками указываются возможные переходы от одного фазового состояния в другое.

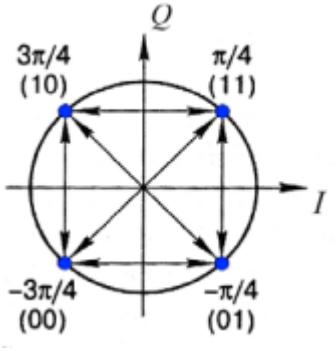


Рисунок 1.2 – Сигнальное созвездие ***QPSK***-модуляции

Из рисунка 1.2 видим, что соответствие между значениями символов и фазой сигнала установлено так, что в соседних точках сигнального созвездия значения соответствующих символов отличаются лишь в одном бите (кодирование по Грею).

Изменение модулирующего сигнала при ***QPSK***-модуляции происходит в ***2*** раза реже, чем при ***BPSK***-модуляции при одинаковой скорости передачи информации, так как каждому значению фазы модулированного сигнала соответствует ***2*** бита информации.

Спектральная плотность мощности многоуровневого сигнала совпадает со спектральной плотностью мощности бинарного сигнала при замене битового интервала $\boldsymbol{T_b}$ на символьный интервал

$$\boldsymbol{T_s = T_b \log_2 M.} \qquad (1.2)$$

Для четырехуровневой модуляции $\boldsymbol{M = 4}$, следовательно, $\boldsymbol{T_s = 2T_b}$.

Сигнал ***QPSK*** можно представить в виде синфазной и квадратурной составляющих:

$$\boldsymbol{s_i(t) = A\cos\varphi_i(t)\cos(\omega_0 t + \varphi_0) + A\sin\varphi_i(t)\sin(\omega_0 t + \varphi_0),} \qquad (1.3)$$

где $\mathbf{I_i(t) = A\cos\varphi_i(t)}$ – синфазная составляющая ***i***-го символа;

$\boldsymbol{Q_i(t) = A\sin\varphi_i(t)}$ – квадратурная составляющая ***i***-го символа.

1.3 Кратко о технологии *LFM_MPSK*

LFM_MPSK технология представляет собой объединение широкополосных сигналов с традиционными методами модуляции узкополосных сигналов. Эта технология сродни технологии прямого расширения спектра, только для расширения спектра информационной последовательности используются ***LFM*** импульсы. Другими словами, в ***LFM_MPSK*** технологии вместо монохромных опорных гармонических генераторов используются повторяющихся ***LFM*** косинусоидальные либо синусоидальные импульсы Длительность повторяющихся ***LFM*** импульсов совпадает с длительностью битов, либо модулирующих символов. Соответственно спектр таких сигналов будет определяться параметрами ***LFM*** импульсов. Для приёма ***LFM_MPSK*** сигналов используется коррелятор.

Остановимся на формировании повторяющихся LFM импульсов на модельном уровне. Простейшая модель формирования включает два генератора повторяющейся последовательности ***Repeating Sequence*** с двумя параметрами – ***Time values*** и ***Output values***. ***Time values*** задаётся массивом значений определяющих точки временного интервала. ***Output values*** также задаётся массивом значений определяющих форму импульса в заданном временном интервале. Интервал времени, задаваемый в обеих генераторах, совпадает с длительностью модулирующего символа. ***Output values*** первого генератора в форме линейной пилы (возрастающей либо убывающей) задаёт девиацию частоты, например, от $\boldsymbol{\omega_{min}}$ до $\boldsymbol{\omega_{max}}$ с необходимым числом промежуточных точек. ***Output values*** второго генератора просто повторяет ***Time values***. ***Output values*** первого генератора можно представить как $\boldsymbol{\omega_i \cdot t_i}$. ***Output values*** второго генератора можно представить как $\boldsymbol{t_i}$. Тогда их произведение представляется как $\boldsymbol{\omega_i \cdot t_i^2}$. Теперь, если подать, сформированные таким образом импульсы в качестве аргумента блока $\boldsymbol{sin}$ или $\boldsymbol{cos}$, то на выходе получим повторяющиеся синусоидальные либо косинусоидальные ***LFM*** импульсы.

Наиболее простая модуляция *LFM_BPSK* представляет собой манипуляцию знака ***LFM*** импульса. Биполярная информационная последовательность имеет два состояния $\boldsymbol{\pm 1}$, что соответствует межсигнальному расстоянию равного ***2***. Для реализации ***LFM_BPSK*** достаточно перемножить псевдослучайную биполярную информационную последовательность и периодически повторяющиеся ***LFM*** импульсы. Ширина спектра ***LFM_BPSK*** сигнала определяется заданной девиацией частоты ***LFM*** импульса и скоростью перестройки частоты. Для приёма ***LFM_BPSK*** сигнала достаточно использовать коррелятор. В плечах коррелятора в пределах бита запоминаются отсчеты синхронизированного опорного ***LFM*** импульса и принятого зашумлённого ***LFM_BPSK*** модулированного сигнала. Затем накопленные отсчеты скалярно перемножаются (перемножаются и суммируются), масштабируются ограничителем до $\boldsymbol{\pm 1}$ и тем самым восстанавливаются принятые биты.

Квадратурная *LFM_QPSK* модуляция. В фазовом кодере псевдослучайный информационный битовый поток преобразуется в пары (дибиты). Дибиты могут принимать ***4***-е состояния (***00 01 10 11***) и каждому из них в соответствии с кодом Грея приписываются фазовые состояния, например, $\boldsymbol{\varphi_k = \pm \pi/4}$, равномерное распределение которых на единичной окружности даёт межсигнальное расстояние $\sqrt{\boldsymbol{2}}$. Вычисляя значения $\boldsymbol{cos(\varphi_k)}$ и $\boldsymbol{sin(\varphi_k)}$, получаем амплитуды квадратурных модулирующих импульсов (символов) равные $\boldsymbol{\pm 1/\sqrt{2}}$ длительностью $\boldsymbol{\tau_s = 2 \cdot \tau_b}$. Квадратурные модулирующие импульсы поступают на первые входы умножителей квадратурного модулятора, а на вторые входы умножителей с формирователей поступают ортогональные косинусоидальные и синусоидальные ***LFM*** импульсы. Квадратурный модулятор заканчивается сумматором.

Прием ***LFM_QPSK*** модулированных сигналов осуществляется двумя корреляторами для разделения квадратурных потоков. На одном плече модулятора накапливаются отсчеты соответствующего синхронизированного ***LFM*** импульса, а на другом плече коррелятора

запоминаются отсчеты принятого зашумлённого ***LFM_QPSK*** модулированного сигнала. По окончании модулирующего символа отсчеты скалярно перемножаются (перемножаются и суммируются) и подаются на вход подсистемы фазового декодера. Фазовый декодер, выполненный программно, по принятым квадратурным проекциям восстанавливает квадранты комплексной плоскости, соответствующие фазовые состояния и дибиты в параллельной (векторной форме), а преобразователь из параллельного представления в последовательное – выдаёт последовательно биты принятого дибита.

2-х канальная передача на основе *LFM_QPSK*. Так как фазовый кодер квадратурный ***LFM_QPSK*** модулятора образует дибиты из информационной последовательности, то можно организовать формирование дибитов из двух независимых информационных потоков. При этом дибиты имеют длительность битов $\boldsymbol{\tau_s = \tau_b}$. Это означает на основе ***LFM_QPSK*** модуляции модно организовать передачу двух независимых информационных каналов в виде квадратурных потоков длительностью в бит.

В приёмной части с помощью корреляторов квадратурные потоки разделяются и подаются на фазовый декодер. Фазовый декодер, по принятым квадратурным проекциям восстанавливает фазовые состояния и дибиты в параллельной (векторной форме). Первая компонента вектора дибита соответствует восстановленным битам первого информационного источника. Вторая компонента вектора дибита соответствует восстановленным битам второго информационного источника.

Квадратурная *LFM_16PSK* модуляция. В фазовом кодере псевдослучайный информационный битовый поток преобразуется в квадробиты. Квадробиты могут принимать 16 состояний и каждому из них в соответствии с кодом Грея приписываются фазовые состояния, равномерное распределение которых на единичной окружности даёт межсигнальное расстояние ***0.3902***. Вычисляя значения $\boldsymbol{cos(\varphi_k)}$ и $\boldsymbol{sin(\varphi_k)}$, получаем амплитуды квадратурных модулирующих импульсов (символов) длительностью $\boldsymbol{\tau_s = 4 \cdot \tau_b}$. Квадратурные модулирующие импульсы поступают на первые входы умножителей квадратурного модулятора, а на вторые входы умножителей с формирователей поступают ортогональные косинусоидальные и синусоидальные ***LFM*** импульсы. Квадратурный модулятор заканчивается сумматором.

Прием ***LFM_16PSK*** модулированных сигналов осуществляется двумя корреляторами для разделения квадратурных потоков. На одном плече модулятора накапливаются отсчеты соответствующего синхронизированного ***LFM*** импульса, а на другом плече коррелятора запоминаются отсчеты принятого зашумлённого ***LFM_16PSK*** модулированного сигнала. По окончании модулирующего символа отсчеты скалярно перемножаются (перемножаются и суммируются) и подаются на вход подсистемы фазового декодера. Фазовый декодер, выполненный программно, по принятым квадратурным проекциям восстанавливает области комплексной плоскости, соответствующие фазовые состояния и квадробиты в параллельной (векторной форме), а преобразователь из параллельного представления в последовательное – выдаёт последовательно биты принятого квадробита.

4-х канальная передача на основе *LFM_16PSK*. Так как фазовый кодер квадратурный ***LFM_16PSK*** модулятора образует квадробиты из информационной последовательности, то можно организовать формирование квадробитов из четырёх независимых информационных потоков. При этом квадробиты имеют длительность битов $\boldsymbol{\tau_s = \tau_b}$. Это означает на основе ***LFM_16PSK*** модуляции модно организовать передачу четырёх независимых информационных каналов в виде квадратурных потоков длительностью в бит.

В приёмной части с помощью корреляторов квадратурные потоки разделяются и подаются на фазовый декодер. Фазовый декодер, по принятым квадратурным проекциям восстанавливает фазовые состояния и квадробиты в параллельной (векторной форме). Номер компоненты вектора квадробита соответствует восстановленным битам соответствующего информационного источника.

2 КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ *SIM*-МОДЕЛИ LFM_*QPSK*-МОДЕМА

Источник биполярной информационной последовательности реализован на основе генератора псевдослучайной последовательности с гауссовским распределением ***Random Number*** и блока двухстороннего ограничителя на основе функции ***sign(x)***. Длина бита информационной последовательности задаётся параметром $\boldsymbol{Sample\ Time = 1}$ генератора ***Random Number***.

На рисунке 2.1 представлена функциональная модель подсистемы ***Phase Coder QPSK modema***, модель образует вектор дибитов при помощи блока ***Mux***. Далее дибиты через блок ***Zero Order Hold*** поступают на вход блока ***MatLab function*** (см. рис 2.2), содержащего ***MatLab*** функцию фазового кодера ***dibit_phaze.*** ***MatLab*** функция назначает дибитам фазовые состояния по типу $\boldsymbol{(\pm\frac{\pi}{4}\ \pm\frac{3\pi}{4})}$. С выхода ***MatLab*** функции состояния поступают на блоки $\boldsymbol{cos}$ и $\boldsymbol{sin}$, а далее на умножители квадратурного модулятора.

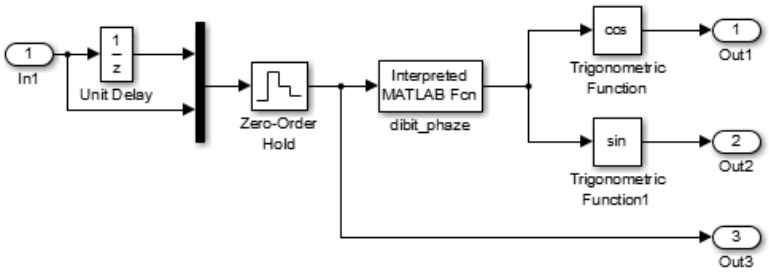


Рисунок 2.1 – Функциональная модель подсистемы ***Phase Coder QPSK*** модема

```
function fi=dibit_phaze(x)

if x== [0; 0]; fi=pi/4; end;
if x== [0; 1]; fi=3*pi/4; end;
if x== [1; 1]; fi=-3*pi/4; end;
if x== [1; 0]; fi=-pi/4; end;
```

Рисунок 2.2 – Функция ***dibit-phaze***

Формирователи ***LFM***-импульсов, изменяющиеся по синусоидальному и косинусоидальному законам, выполнены на основе двух генераторов ***Repeating Sequence.*** В первом генераторе задается параметр ***Time values*** от ***0*** до ***1*** с шагом ***1/4*** – как модельное время, а во втором генераторе – ***Output values*** от ***6*pi*** до ***30*pi*** с шагом ***6*pi*** – как девиация частоты. Также на основе второго генератора ***Repeating Sequence*** с параметрами ***Time values*** от ***0*** до ***1*** с шагом ***1/4*** и ***Output values*** от ***0*** до ***1*** с шагом ***1/4*** – как дополнительного модельного времени. После блока ***Product*** имеем аргумент ***LFM*** сигнала, который подаётся на блоки $\boldsymbol{cos}$ и $\boldsymbol{sin}$, с выхода которого получается последовательность ***LFM***-импульсов. Длительность ***LFM***-импульса совпадает с длительностью бита.

LFM_QPSK модулятор выполнен на основе умножителя ***Product***, на первый вход которого поступают сформированные ***LFM***-импульсы, а на второй – биполярная информационная последовательность. На выходе модулятора получаем последовательность фазоманипулированных ***LFM***-импульсов.

Простейшая модель канала распространения собрана на основе блока ***Sum***, на второй вход которого поступает шумовая псевдослучайная последовательность с гауссовским распределением ***Random Number***. Параметр генератора ***Sample Time*** позволяет реализовать

необходимую широкополосность шумов канала распространения. Параметр ***Variance*** позволяет регулировать мощность шумов в процессе измерения помехоустойчивости (зависимости вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум (***SNR***)).

На каждый квадратурный канал реализуется отдельный корреляционный приёмник. Корреляционный прием и обработка сигнала реализованы на основе простейшего коррелятора при сдвиге $\boldsymbol{\tau = 0}$. Плечи корреляционного приёмника состоят из экстраполяторов нулевого порядка ***Zero-Order Hold*** и блока ***Buffer***, которые накапливают в течение символа отсчеты опорного колебания и принятого в шумах ***LFM_QPSK*** модулированного радиосигнала. Накопленные отсчеты скалярно перемножаются как вектора и суммируются блоками ***Product*** и ***Sum***. Блок ***Frame Status Conversion*** преобразовывает фреймовый тип данных в тип ***double***. В данном случае реализуется накопление ***128*** отсчетов в течение символа. Блок ***Zero-Order Hold*** снимает отсчеты коррелятора, а блок ***sign(x)*** нормализует их к $\boldsymbol{\pm 1}$. Таким образом, происходит восстановление передаваемого символьного потока.

На рисунке 2.3 представлен классический фазовый декодер, на который поступают квадратурные сигналы с выходов корреляторов каналов. На выходе декодера в виде вектора получаются демодулированные биты информационных каналов в форме вектора.

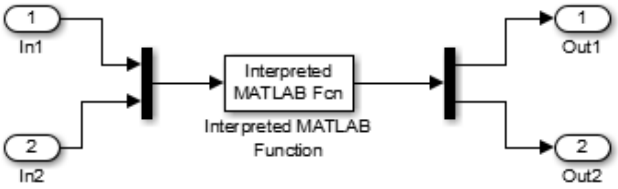


Рисунок 2.3 – Функциональная модель фазового декодера

На рисунке 2.4 представлена функция блока ***Matlab function***, которая по принятым проекциям определяет области фазовой плоскости и восстанавливает дибиты, как векторы.

```
1     function y=phaze_dibit(x)
2
3 -     if((x(1)==0) && (x(2)==0)); y=[0 0]; end;
4 -     if((x(1)>=0) && (x(2)>=0)); y=[0 0]; end;
5 -     if((x(1)<0) && (x(2)>=0)); y=[0 1]; end;
6 -     if((x(1)<0) && (x(2)<0)); y=[1 1]; end;
7 -     if((x(1)>=0) && (x(2)<0)); y=[1 0]; end;
```

Рисунок 2.4 – Функция ***phase-dibit***

Далее блок двухпортового ***Switch*** под управлением блока ***Pulse Generator*** преобразует параллельное векторное представление дибитов в последовательный поток принятых битов.

Подсистема ***Subsystem Calc Err***, блоки ***Display*** и ***Scope*** отображают число ошибок передачи и фиксации момента их возникновения.

Подсистема ***Subsystem Measuring Power*** и блок ***Scope*** вычисляют и отображают изменение уровня мощности сигнала или смеси сигнал+шум в процессе измерения помехоустойчивости. Точка подключения измерителя мощности обусловлена блоком принятия решений, который соответствует блоку ***Zero-Order Hold***.

Блоки ***Spectrum Scope*** и ***Averaging Power Spectral Density*** отображают спектры сигнальных и шумовых потоков.

На рисунке 2.5 представлена функциональная модель ***LFM_QPSK*** модема с корреляционным приёмником

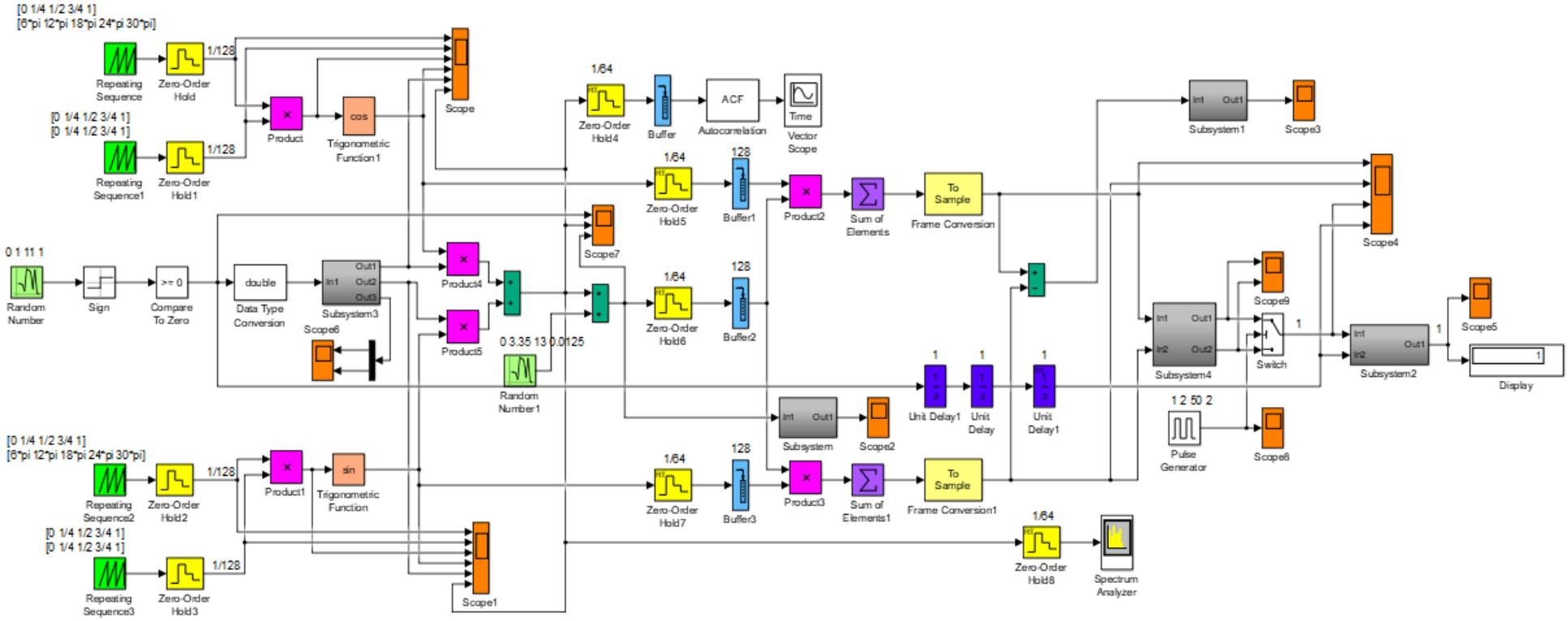


Рисунок 2.5 – Модель ***LFM_QPSK*** модема с корреляционным приемником

Упрощенная реализация корреляционной обработки позволяет найти отсчет автокорреляционной функции опорного колебания и зашумленного радиосигнала при смещении $\boldsymbol{\tau = 0}$ и в зависимости от знака корреляции принять решение о приеме ***1*** или ***-1***.

На рисунке 2.6 представлена **подсистема измерения мощности** сигнала и/или шума.

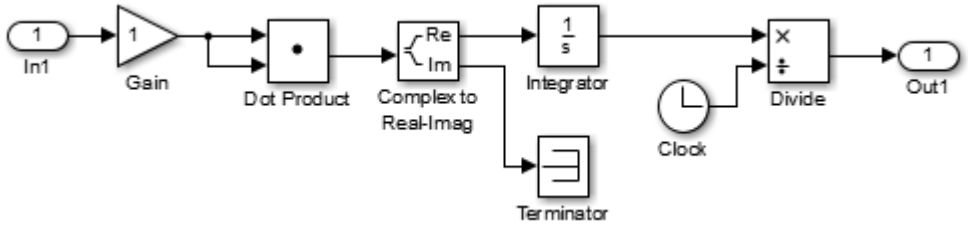


Рисунок 2.6 – Подсистема измерения мощности

Данная подсистема позволяет измерить мощность регулярных, случайных, вещественных и комплексных процессов. При помощи блока ***Dot Product*** процесс умножается на сопряженный. Далее с помощью блока ***Complex to Real-Imag*** выделяется вещественная часть. Блок ***Integrator*** вычисляет энергию процесса, а деление энергии (блок ***Divide***) на время (блок ***Clock***) вычисляет мощность как скорость поступления энергии.

На рисунке 2.7 представлена **подсистема подсчета ошибок**.

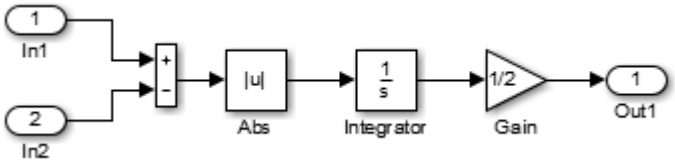


Рисунок 2.7 – Подсистема подсчета ошибок

В детекторе ошибок вычисляется интеграл от модуля разности входных последовательностей, т.е. площадь разностного процесса. Затем, в зависимости от длительности битов и одно- или биполярности подбирается множитель ***Gain***, переводящий интеграл разности в эквивалентное количество битов (ошибок).

На первый вход подается сигнал, который проходит через всю схему, на второй вход подается сигнал с генератора входной информационной последовательности с необходимой задержкой. К выходу подсистемы присоединен дисплей, на котором будет отображаться наличие ошибок и их количество.

Модель коррелятора. Корреляционный приемник реализован следующим образом (см. рис. 2.8):

При реализации функциональной модели корреляционного приема решено ограничиться значением функции корреляции при $\boldsymbol{\tau = 0}$.

Т.к. используются дискретные (цифровые) сигналы, то значение функции корреляции вычисляется через сумму произведений отсчетов принятого сигнала и колебаний опорного формирователя ***LFM*** импульсов. Модель коррелятора содержит два плеча накопления отсчетов. В каждом плече с помощью блоков ***Zero-Order Hold*** сигнал дискретизируется на отсчеты (в данном случае на ***64***) и ***128*** отсчётов накапливаются в блоках ***Buffer***. Далее накопленные отсчеты попарно перемножаются в блоке ***Product***. Затем вычисляется сумма этих произведений блоком ***Sum***, т.е. реализуется скалярное произведение векторов

накопленных отсчетов.

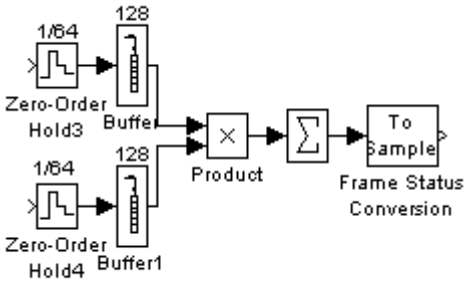


Рисунок 2.8 – Реализация корреляционного приемника

Измерение отношения сигнал/шум (SNR). Для того чтобы определить мощность сигнала без шума ($\boldsymbol{S}$) необходимо отсоединить генератор шума от модели канала распространения. Для того чтобы определить мощность смеси полезного сигнала с шумом ($\boldsymbol{SN}$) генератор шумов должен быть подключен к каналу распространения. Изменение отношения сигнал/шум $\boldsymbol{SNR}$ достигается вариацией параметра дисперсии генератора псевдослучайной гауссовской последовательности модели канала распространения.

Отношение сигнал/шум ($\boldsymbol{SNR}$) рассчитывается по следующей формуле:

$$\boldsymbol{SNR} = \frac{\boldsymbol{S}}{(\boldsymbol{SN}-\boldsymbol{S})}. \qquad (2.1)$$

Результаты измерений фиксируются в дБ.

При большом числе испытаний, частота появлений битовых ошибок, т.е. отношение числа ошибок к общему числу битов, стремится к вероятности битовых ошибок.

Следовательно, измерение $\boldsymbol{SNR}$ при соответствующем числе ошибок позволяет определить точки водопадоподобной характеристики, позволяющей оценить помехоустойчивость модема.

3 ПРИНЦИП РАБОТЫ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ *SIM*-МОДЕЛИ *LFM_QPSK*-МОДЕМА

Опишем принцип работы ***LFM-QPSK*** модема по функциональной модели, представленной на рисунке 2.5.

Фазовый кодер ***Phase Coder QPSK*** модема (см. рис. 2.1) формирует дибиты, назначает им фазовые состояния $\boldsymbol{\varphi_k}$ (см. текст на рис. 2.2), вычисляет значения $\boldsymbol{cos}\,(\boldsymbol{\varphi_k})$ и $\boldsymbol{sin}\,(\boldsymbol{\varphi_k})$ создаёт управляющие квадратурные символы.

На основе генераторов ***Repeating Sequense*** выполнены формирователи ***LFM***-импульсов, изменяющиеся, по косинусоидальному и синусоидальному законам. Каждый из формирователей содержит по два генератора: первый задаёт девиацию частоты во времени ***LFM*** импульса, а второй – дополнительное модельное время. Блоки ***Product*** реализуют аргумент ***LFM*** импульса и подают его на блок $\boldsymbol{sin}$, с выходов которых получаем повторяющуиеся последовательности косинусоидальных и синусоидальных ***LFM***-импульсов длительностью $\boldsymbol{\tau_b}$.

Квадратурный ***LFM_QPSK*** модулятор в каждом канале перемножает опорные косинусоидальные и синусоидальные ***LFM*** импульсы, и импульсы $\boldsymbol{cos}\,(\boldsymbol{\varphi_k})$ и $\mathbf{sin}\,(\boldsymbol{\varphi_k})$ фазовых состояний дибитов. После суммирования сигналов плеч модулятора получаем квадратурно фазоманипулированный ***LFM***-импульс.

Простейший имитатор канала распространения радиосигнала на основе блока ***Sum*** добавляет широкополосные шумы и позволяет менять интенсивность шумов в процессе измерения помехоустойчивости.

В кваждом квадратурном канале обработки реализуется свой корреляционный приёмник. Корреляционный прием и обработка сигнала реализованы на основе простейшего коррелятора при сдвиге $\boldsymbol{\tau = 0}$. Плечи корреляционного приёмника накапливают в течение бита отсчеты опорного колебания (опорного ***LFM*** импульса) и принятого в шумах ***LFM_QPSK*** модулированного радиосигнала. Накопленные отсчеты, как вектора скалярно перемножаются и суммируются блоками ***Product*** и ***Sum***. Блок ***Frame Status Conversion*** призван преобразовать фреймовый тип данных в тип ***double***. В данном случае реализуется накопление ***128*** отсчетов в течение модулирующего символа.

Принятые квадратурные сигналы канала приёма с выхода корреляторов через блок ***Zero Order Hold*** подаются на классический фазовый декодер. В результате с выхода декодера имеем демодулированные дибиты информационных каналов в виде вектора.

Преобразователь параллельного представления в последовательное на основе двухпортового **Switch** выдаёт на выходе последовательность принятых битов.

Для иллюстрации работы модема на рисунке 3.1 приведены фрагменты осциллограмм формирователя косинусоидальных ***LFM***-импульсов, импульсов на выходе плеча квадратурного модулятора.

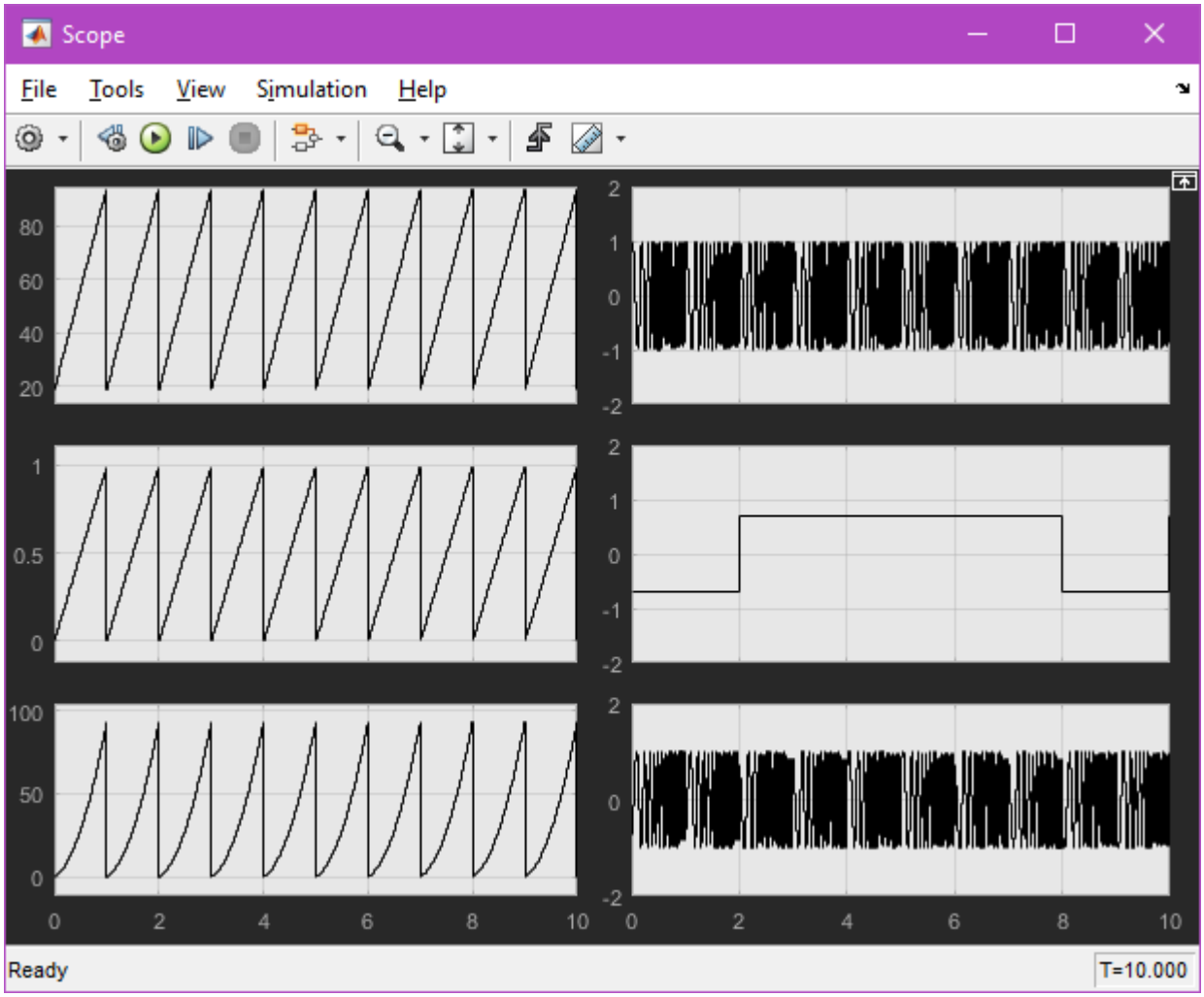


Рисунок 3.1 - Фрагменты осциллограмм формирователя косинусоидальных ***LFM***-импульсов, импульсов на выходе плеча квадратурного модулятора (1 - импульсы девиации частоты; 2 - импульсы модельного времени; 3 - импульсы аргумента косинусоидальных ***LFM***-импульса; 4 – косинусоидальные ***LFM***-импульсов; 5 – квадратурный модулирующий символ; 6 - модулированные ***LFM*** импульсы)

На рисунке 3.2 приведены фрагменты осциллограмм информационной битовой последовательности и радиоимпульсов каналов передачи до и после канала распространения.

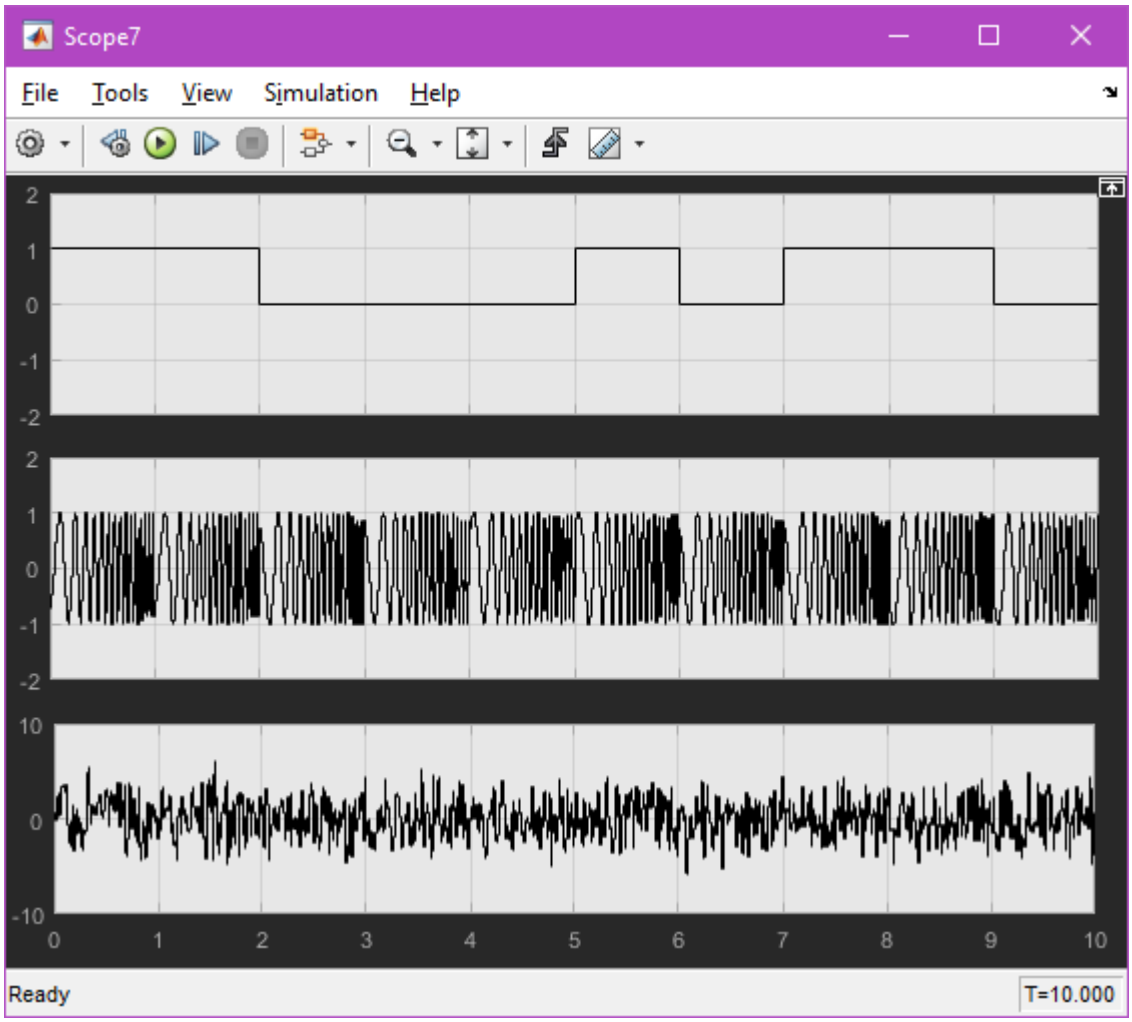


Рисунок 3.2 - Фрагменты осциллограмм информационной битовой последовательности и радиоимпульсов каналов передачи до и после канала распространения

На рисунке 3.3 приведены фрагменты осциллограмм квадратурных последовательностей модулированных ***LFM_QPSK*** импульсов, принятых корреляторами сигналов, а также принятых и передаваемых битов.

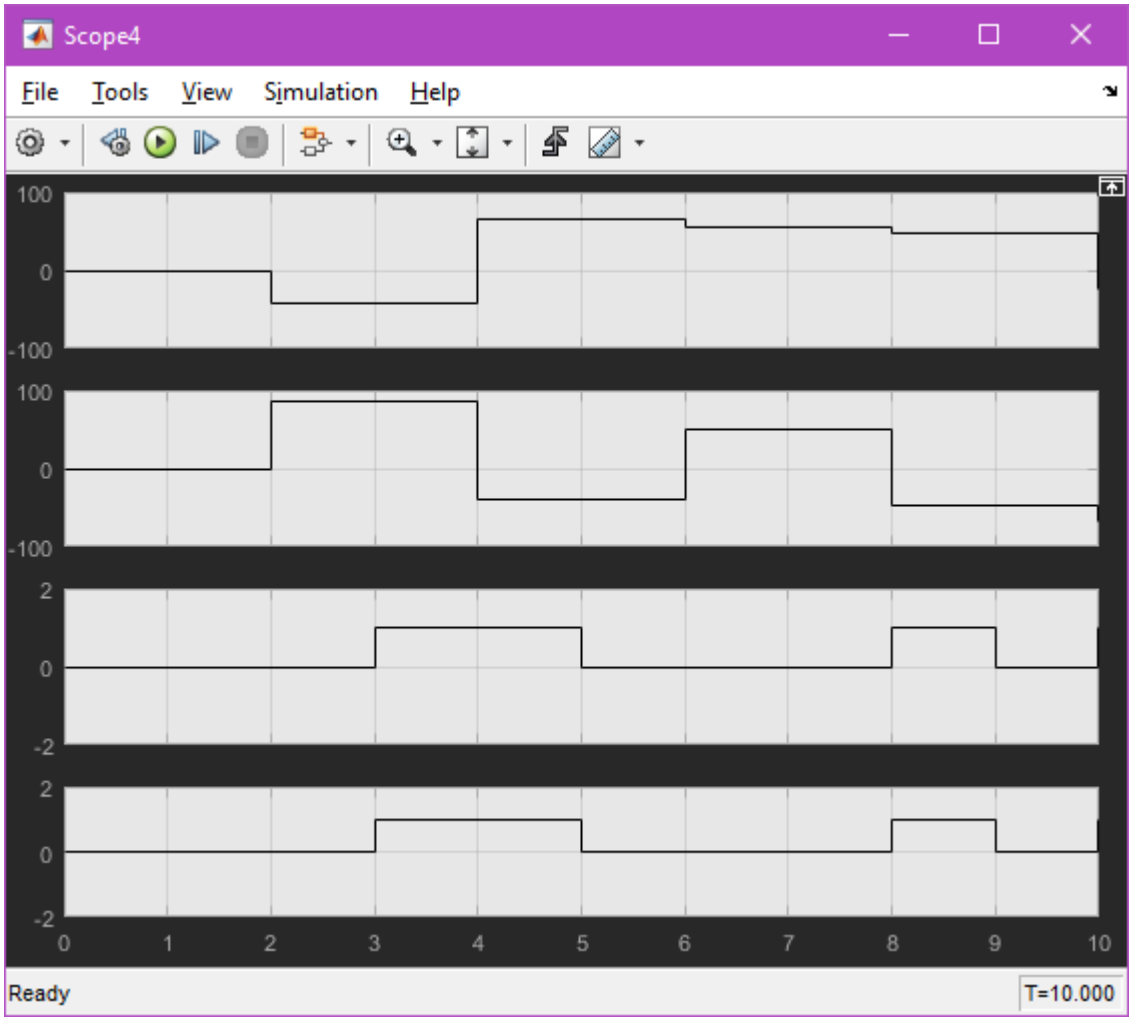


Рисунок 3.3 - Фрагменты осциллограмм квадратурных последовательностей модулированных ***LFM_QPSK*** импульсов, принятых корреляторами сигналов, а также принятых и передаваемых битов

На рисунке 3.4 приведена автокорреляционная функция косинусоидальных ***LFM***-импульсов.

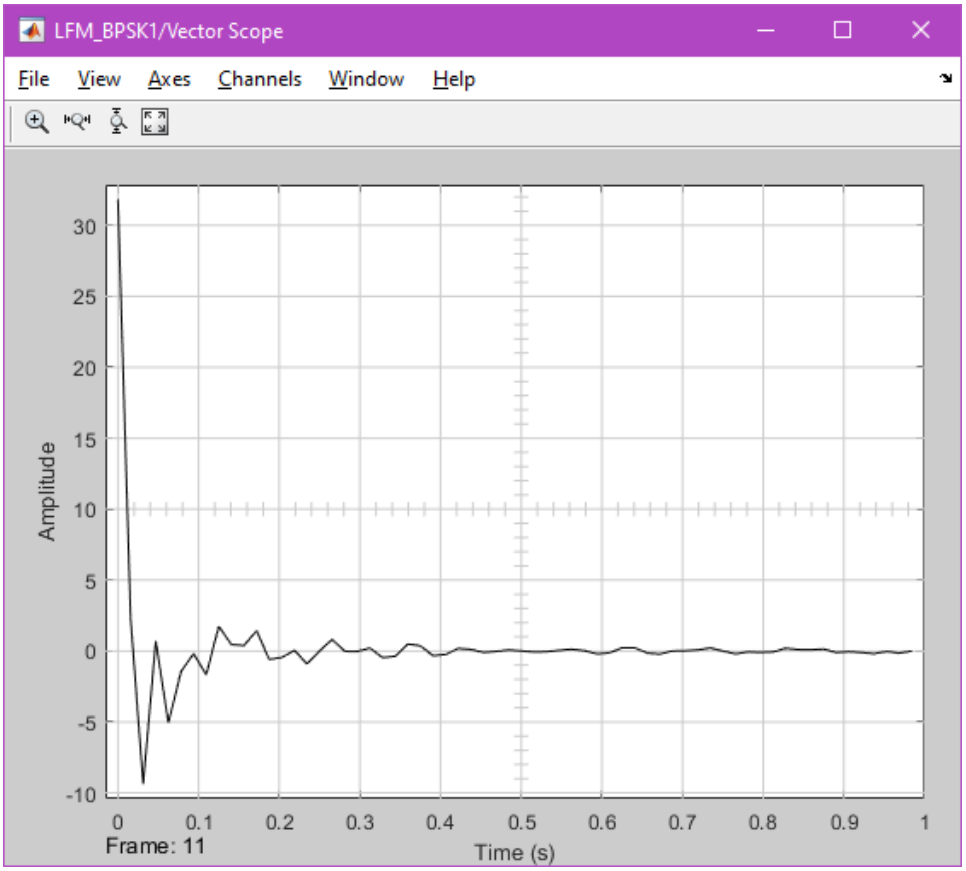


Рисунок 3.4 – Автокорреляционная функция косинусоидальных ***LFM***-импульсов

На рисунке 3.5 приведен спектр ***LFM-QPSK*** модулированного сигнала.

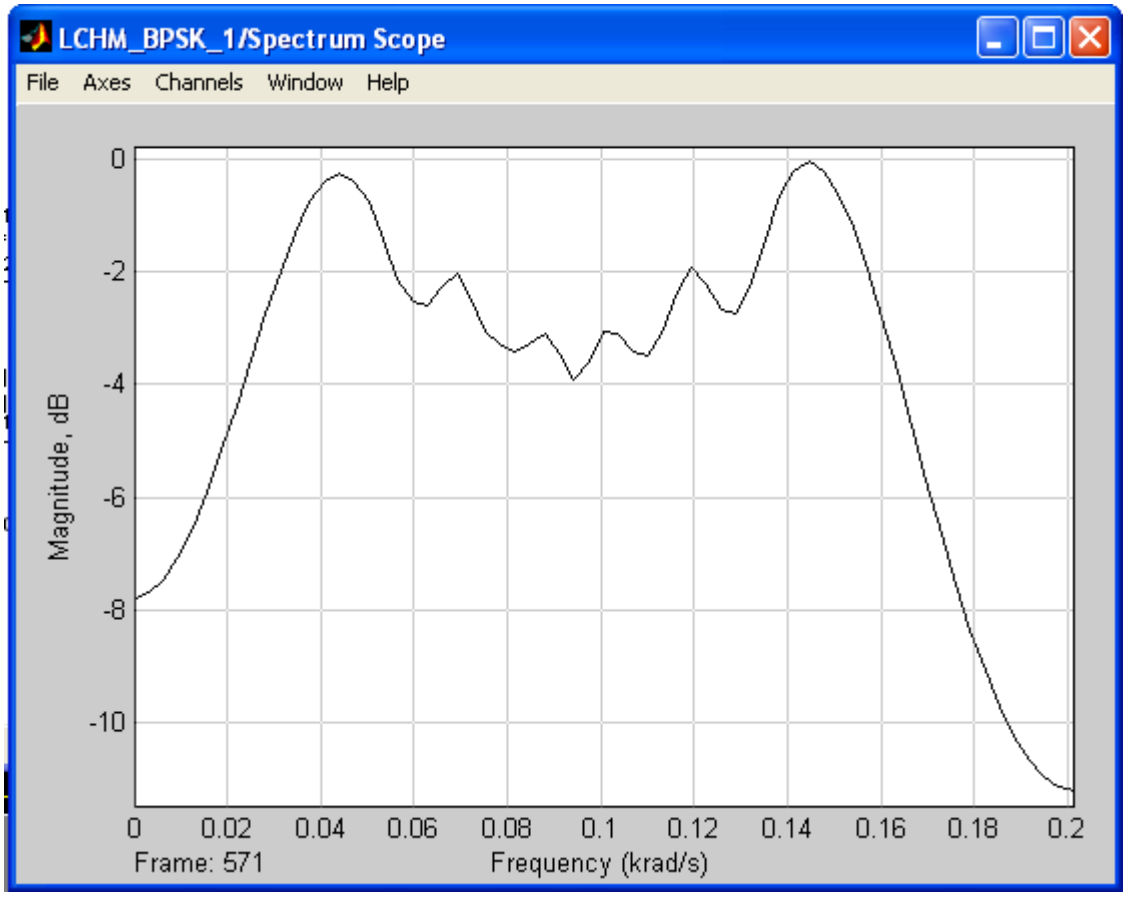


Рисунок 3.5 – Спектр ***LFM-QPSK*** модулированного сигнала

Приведённые осциллограммы модельного исследования ***LFM-QPSK*** модема призваны ориентировать студента в процессе выполнения лабораторной работы.

4 КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ПАКЕТА SIMULINK И ИСПОЛЬЗУЕМЫХ БЛОКОВ

Пакет ***Simulink*** разработан компанией ***Mathworks*** и распространяется в составе математического пакета ***MatLab***. Пакет основан на графическом интерфейсе и является типичным средством визуально-ориентированного программирования. Он обладает обширной библиотекой готовых блоков с модифицируемыми параметрами для построения моделей рассматриваемых систем и наглядными средствами визуализации результатов моделирования [6–9].

4.1 Запуск и работа с пакетом *Simulink*

Для того чтобы запустить пакет *Simulink*, необходимо предварительно выполнить запуск системы ***MatLab***. После открытия командного окна системы ***MatLab*** необходимо запустить систему ***Simulink***. Запустить систему ***Simulink*** можно тремя способами:

1) нажать кнопку  (***Simulink***) на панели инструментов системы ***MatLab***;
2) в строке командного окна ***MatLab*** напечатать ***Simulink*** и нажать клавишу ***Enter***;
3) в меню ***File*** выполнить опцию ***Open*** и открыть файл модели (***mdl***- файл).

Последний способ предпочтителен при запуске уже готовой и отлаженной модели, когда требуется лишь провести моделирование и не нужно добавлять новые блоки в модель. При применении двух первых способов открывается окно обозревателя библиотеки блоков (***Simulink Library Browser***) (рисунок 4.1).

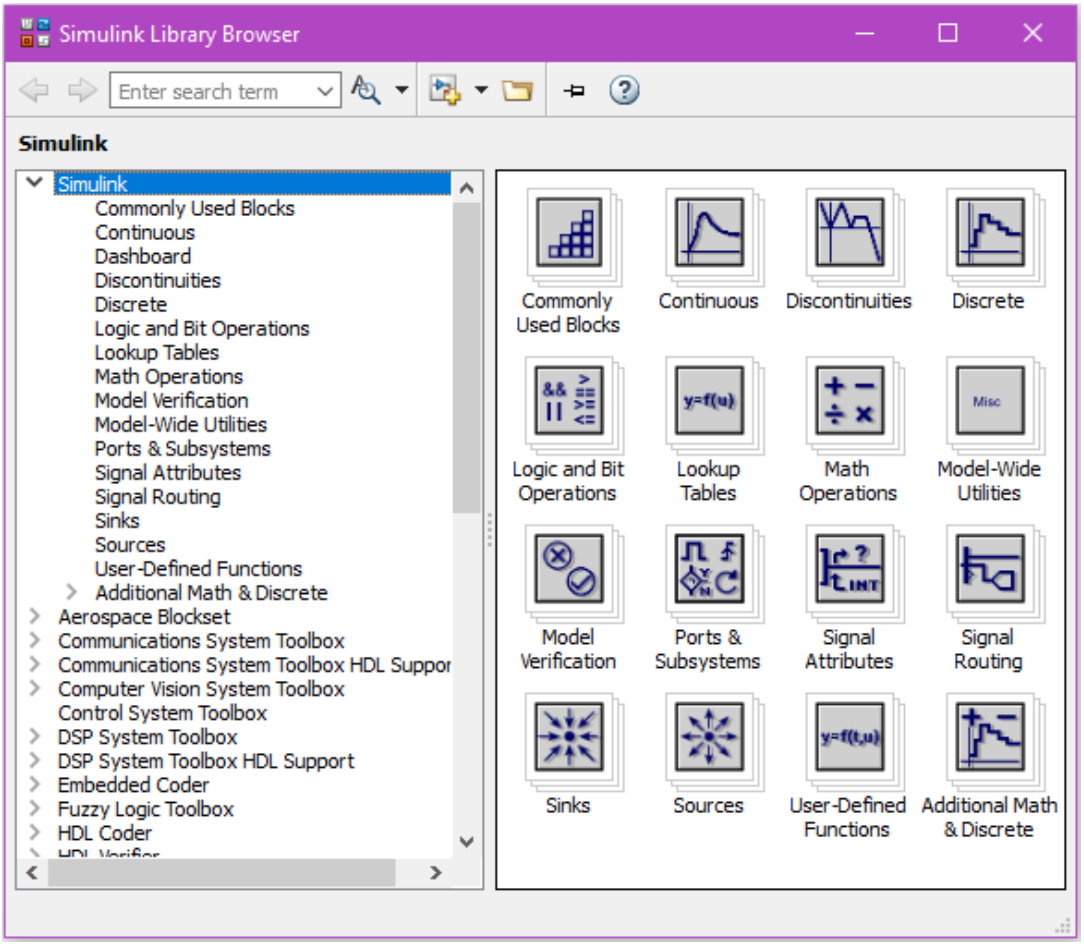


Рисунок 4.1 – Библиотека блоков ***Simulink Library Browser***

На рисунке 4.1 в левой части окна выведена библиотека системы ***Simulink***, а в правой части окна показаны ее разделы. Основная библиотека системы содержит следующие разделы:

1) ***Continuous*** – блоки аналоговых элементов;
2) ***Discontinuous*** – блоки нелинейных элементов;
3) ***Discrete*** – блоки дискретных элементов;
4) ***Look-Up Tables*** – блоки таблиц;
5) ***Math Operations*** – блоки элементов, определяющие математические операции;
6) ***Model Verification*** – блоки проверки свойств сигнала;
7) ***Model-Wide Utilities*** – раздел дополнительных утилит;
8) ***Port & Subsystems*** – порты и подсистемы;
9) ***Signal Attributes*** – блоки маршрутизации сигналов;
10) ***Signal Routing*** – блоки маршрутизации сигналов;
11) ***Sinks*** – блоки приема и отображения сигналов;
12) ***Sources*** – блоки источников сигнала;
13) ***User-Defined Function*** – функции, определяемые пользователем.

4.2 Описание используемых блоков библиотеки *Simulink*

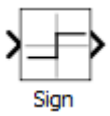
Ниже описаны основные блоки базовых разделов библиотеки ***Simulink***, используемые в функциональной схеме ***LFM_BPSK***-модема:

Repeating Sequence – выводит периодический скалярный сигнал, имеющий форму волны, что вы задаете использование параметры **Output values** и **Time values**. Параметр **Time values** задает вектор выходных времен. Параметр **Output values** задает вектор из амплитуд сигнала в соответствующие выходные времена. Вместе, эти два параметра задают выборку выходной формы волны в точках, измеренных с начала интервала, на котором форма волны повторяется (период сигнала).

По умолчанию обоими параметрами является [***0 2***]. Эти настройки по умолчанию задают пилообразную форму волны, которая повторяет каждый ***2*** секунды от запуска симуляции и имеют максимальную амплитуду ***2***.

Zero-Order Hold – экстраполятор нулевого порядка. Назначение: экстраполяция входного сигнала на интервале дискретизации. Блок фиксирует значение входного сигнала в начале интервала дискретизации и поддерживает на выходе это значение до окончания интервала дискретизации. Затем выходной сигнал изменяется скачком до величины входного сигнала на следующем шаге дискретизации. Параметры блока: ***Sample time*** – такт дискретности. Блок экстраполятора нулевого порядка может использоваться также для согласования работы дискретных блоков, имеющих разные такты дискретности.

Random Number – блок источника случайного дискретного сигнала с нормальным распределением. Назначение: формирование случайного сигнала с нормальным распределением уровня сигнала. Параметры блока: ***Mean*** - среднее значение сигнала, ***Variance*** - дисперсия (среднеквадратическое отклонение), ***Initial seed*** – начальное значение.

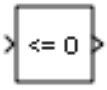


Sign – блок определения знака сигнала. Назначение: определяет знак входного сигнала, при этом, если ***x*** – входной сигнал, то сигнал на выходе определяется выражением:

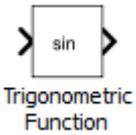
$$sign = \begin{cases} -1, & \text{где } x < 0; \\ 0, & \text{где } x = 0; \\ 1, & \text{где } x > 0. \end{cases}$$

Параметры блока: флажок ***Enable zero crossing detection*** позволяет фиксировать прохождение сигнала через нулевой уровень.

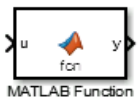
Product – блок умножения и деления. Назначение: вычисление произведения текущих значений сигналов. Параметры блока: ***Number of inputs*** – количество входов, может задаваться как число или как список знаков. В списке знаков можно использовать знаки: * – умножить и / – разделить. ***Multiplication*** – способ выполнения операции, может принимать значения из списка: ***Element-wise*** – поэлементный; ***Matrix*** – матричный. Флажок ***Show additional parameters*** – показать дополнительные параметры. При выставленном флажке отображается окно списка ***Output data type mode***, в нашем случае флажок не используется.



Compare To Zero - Блок ***Compare To Zero*** сравнивает входной сигнал, чтобы обнулить. Задайте, как вход сравнивается с нулем параметром ***Operator***. Выходом является ***0*** если сравнение является ложным, и ***1*** если это верно.



Trigonometric Function – тригонометрическая функция. *Назначение:* вычляет выбранную тригонометрическую функцию. *Параметры блока:* ***Function*** - вид вычисляемой функции. Вид функции выбирается из списка: ***sin, cos, tan, asin, acos, atan, atan2, sinh, cosh, tanh***. ***Output signal type*** - тип выходного сигнала. Тип выходного сигнала выбирается из списка: ***auto***- автоматическое определение типа, ***real*** - действительный сигнал, ***complex***- комплексный сигнал. При векторном или матричном входном сигнале блок выполняет поэлементное вычисление заданной функции.

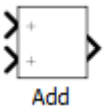


MatLab Fcn – блок задания функции. Назначение: задает выражение в стиле языка программирования ***MatLab***. Параметры: ***MatLab function*** – Выражение на языке ***MatLab***. ***Output dimensions*** – размерность выходного сигнала. Значение параметра минус ***1*** предписывает блоку определять размерность автоматически. ***Output signal type*** – тип выходного сигнала. Выбирается из списка: ***real*** – действительный сигнал, ***complex*** – комплексный сигнал, ***auto*** – автоматическое определение типа сигнала; ***Collapse 2-D results to 1-D*** – преобразование двумерного выходного сигнала к одномерному.

Demux - извлекает компоненты сигнала входного вектора и выходных параметров отдельные сигналы. Порты выходного сигнала упорядочены сверху донизу.

Mux - комбинирует входные параметры с совпадающим типом данных и сложностью в векторный выход. Выходной сигнал мультиплексора является плоским, даже если вы создаете сигнал мультиплексора из других сигналов мультиплексора. Однако можно использовать несколько блоков **Mux**, чтобы создать сигнал мультиплексора шаг за шагом. Сигнал мультиплексора упрощает общий вид модели путем объединения двух или больше сигнальных линий в одну линию. Сигналы мультиплексора не влияют на симуляцию или генерацию кода.

Scope – блок осциллографа. Назначение: построение графиков исследуемых сигналов как функций времени. Открытие окна осциллографа производится двойным щелчком ***ЛКМ*** на пиктограмме блока. В случае векторного сигнала каждая компонента вектора отображается отдельным цветом. Настройка окна осциллографа выполняется с помощью панелей инструментов, позволяющих: осуществить печать содержимого окна осциллографа; установить параметры, в частности, ***Number of axes*** – число входов осциллографа, ***Time range*** – отображаемый временной интервал и другие; изменить масштабы графиков; установить и сохранить настройки; перевести в плавающий режим и так далее.



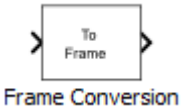
Add – блок сумматора. Назначение: вычисление алгебраической суммы

текущих значений входных сигналов. Параметры блока: ***Icon shape*** – форма блока, выбирается из списка: ***round*** – круг; ***rectangular*** – прямоугольник. ***List of sign*** – список знаков из набора: + – плюс; - – минус, | – разделитель. Флажок ***Show additional parameters*** – показать дополнительные параметры, при выставленном флажке отображаются окна списка ***Output data type mode***, в нашем случае не используется. Количество входов и соответствующие им операции определяются списком знаков ***List of sign***. При этом метки входов обозначаются соответствующими знаками. В списке ***List of sign*** можно также указать число входов, при этом все входы будут суммирующими.

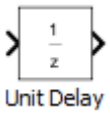
Buffer – Буферная входная последовательность к меньшему или большему формату кадра. Всегда выполняет основанную на системе координат обработку. Блок перераспределяет данные в каждом столбце входа, чтобы произвести выход с различным форматом кадра. Буферизация сигнала к большему формату кадра дает к выходу с более медленной частотой кадров, чем вход.

Autocorrelation – в этом блоке вычисляется автокорреляционная функция сегмента сигнала. Число отсчетов корреляционной функции определяется заданной величиной порядка предсказания, то есть числом предыдущих отсчетов сигнала, по которым предсказывается значение последующего отсчета.

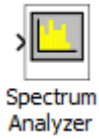
Sum – блок выполняет сложение или вычитание на его входных параметрах. Этот блок может добавить или вычесть скаляр, вектор или матричные входные параметры. Это может также свернуть элементы сигнала и выполнить суммирование. Блок ***Sum*** сначала преобразует тип входных данных в свой тип данных аккумулятора, затем выполняет заданные операции. Блок преобразует результат в свой тип выходных данных с помощью заданного округления и режимов переполнения.



Frame Conversion – данный блок передает вход до выхода и устанавливает выходной режим выборки на значение параметра ***Sampling mode of output signal***, который может быть любой ***Frame-based*** или ***Sample-based***. Задайте режим выборки выходного сигнала ***Sample-based***.



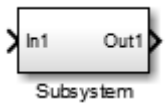
Unit delay – блок единичной дискретной задержки. Назначение: выполняет задержку дискретного сигнала на заданный шаг модельного времени. Параметры блока: ***Initial conditions*** – начальное значение выходного сигнала; ***Sample time*** – шаг модельного времени.



Spectrum Analyzer – блок, упомянутый здесь как осциллограф, отображает спектры частоты сигналов. Панель ***Spectrum Settings*** появляется в правой стороне окна ***Spectrum Analyzer***. Эти настройки управляют, как спектр вычисляется. Чтобы показать Настройки Спектра, в меню ***Spectrum Analyzer***, выбирают ***View> Spectrum Settings***. Диалоговое окно ***Configuration Properties*** управляет визуальными аспектами Спектр Анализатора. Чтобы открыть ***Configuration Properties***, в меню ***Spectrum Analyzer***, выбирают ***View> Configuration Properties***. Средства управления появляется в виде диалогового окна ***Style***, Спектр Анализатора. Чтобы открыть Свойства стиля, в меню **Spectrum Analyzer**, выбирают ***View> Style***. Диалоговое окно ***Axes Scaling*** управляет пределами осей Спектра Анализатор. Чтобы открыть свойства ***Axes Scaling***, в меню ***Spectrum Analyzer***, выбирают ***Tools> Axes Scaling> Axes Scaling Properties***.

Display – блок цифрового дисплея. Назначение: отображает значение сигнала в виде числа. Параметры: ***Format*** – формат отображения данных. Параметр ***Format*** может принимать следующие значения: ***short*** **– 5** значащих десятичных цифр, ***long*** **– 15** значащих десятичных цифр, ***short_e*** **– 5** значащих десятичных цифр и ***3*** символа степени десяти, **long_e – 15** значащих десятичных цифр и ***3***

символа степени десяти, ***bank*** – "денежный" формат. Формат с фиксированной точкой и двумя десятичными цифрами в дробной части числа; ***Decimation*** – кратность отображения входного сигнала, при ***Decimation* = 1** отображается каждое значение входного сигнала, при ***Decimation* = 2** отображается каждое второе значение, при ***Decimation* = 3** – каждое третье значение и т.д; ***Sample time*** – шаг модельного времени. Определяет дискретность отображения данных; ***Floating display*** (флажок) – перевод блока в "свободный" режим. В данном режиме входной порт блока отсутствует, а выбор сигнала для отображения выполняется щелчком ***ЛКМ*** на соответствующей лини связи. В этом режиме для параметра расчета ***Signal storage reuse*** должно быть установлено значение **off** (вкладка ***Advanced*** в окне диалога ***Simulation parameters***…).



Subsystem – виртуальная и монолитная подсистемы. Доступ к окну параметров подсистемы осуществляется через меню ***Edit*** командой ***Block Parameters***. Параметры: ***Show port labels*** – показать метки портов, ***Treat as atomic unit*** (флажок) – считать подсистему монолитной. Таким образом, блоки виртуальной и монолитной подсистем – это один и тот же блок, отличающийся значением данного параметра. ***Access*** – доступность подсистемы для изменений. Выбирается из списка: ***ReadWrite*** – пользователь может открывать и изменять подсистему, ***ReadOnly*** – пользователь может открывать подсистему только для просмотра, ***NoReadOrWrite*** – пользователь не может открывать и изменять подсистему; ***Name of error callback function*** – имя функции используемой для обработки ошибок возникающих в данной подсистеме.

Gain – блок усилителя. Назначение: блок ***Gain*** умножает входной сигнал на постоянный коэффициент; Параметры блока: ***Multiplication*** – способ выполнения операции, значение параметра выбирается из списка: ***Element-wise K*u*** – поэлементный; ***Matrix K*u*** – матричный, коэффициент усиления является левосторонним оператором; ***Matrix u*K*** – матричный, коэффициент усиления является правосторонним оператором; ***Matrix K*u*** (***u***-вектор) – векторный, коэффициент усиления является левосторонним оператором. Флажок ***Show additional parameters*** – показать дополнительные параметры, при выставленном флажке отображаются окна списков ***Parameter data type mode, Output data type mode. Saturate on integer*** – подавлять переполнение целого. При установленном флажке ограничение сигналов целого типа выполняется корректно.

Clock – Источник времени. Назначение: формирует сигнал, величина которого на каждом шаге равна текущему значению моделирования. Параметры блока: ***Decimation*** - Шаг, с которым обновляются показания времени на изображении источник. Параметр задается как количество шагов расчета.

5 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ

Исходные данные.

Для исследования ***LFM_QPSK*** модема в генераторе ***Random Number*** задаются параметры ***0 1 11 1***, с помощью параметра ***Sample Time*** задается длительность бита $\boldsymbol{\tau_b = 1}$. В формирователях ***LFM***-импульсов для блока ***Repeating Sequence*** заданы параметры модельного времени **(*Time values)*: [*0 1/4 1/2 3/4 1*]** и параметры девиации частоты **(*Output values:)* [*6*pi 12*pi 18*pi 24*pi 30*pi*].** В блоках ***Zero Order Hold*** задаем параметр ***Sample Time*** = ***1/128***. В плечах корреляционного приёмника в блоке ***Zero Order Hold*** параметр ***Sample Time*** = ***1/64,*** а в блоке ***Buffer*** параметр ***Output buffer size*** = ***128***. В модели канала распространения для шумовой псевдослучайной последовательности с гауссовским распределением **Random Number** заданы параметры ***0 3.35 13 0.0125***. Все основные параметры блоков, указаны на рисунке 2.5 над блоками.

Экспериментальное задание.

1. Написать ***MatLab***-функции, показанные на рисунках 2.2 и 2.4.
2. Собрать Sim-модель ***LFM_QPSK***-модема в соответствии с рисунком 2.5. В блоке ***Repeating Sequence*** задать параметры девиации частоты от ***6*pi*** до ***30*pi***.
3. Вычислить отношение сигнал/шум (***SNR***) при ***1, 3, 5*** и ***8*** ошибках, и оценить помехоустойчивость модема.
4. Сравнить результаты и сделать выводы. (Справка: для ***LFM_BPSK***-модема при $\boldsymbol{P_b = 10^{-3}}$ отношение сигнал/шум составило $\boldsymbol{SNR = 8.65\ dB}$).
5. Составить отчёт по проделанной работе.
6. Ответить на контрольные вопросы по лабораторной работе.

6 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Опишите принцип ***LFM***-модуляции.
2. Опишите принцип квадратурной фазовой манипуляции (***QPSK***).
3. Какими преимуществами обладает ***LFM***-модуляция?
4. Как формируется последовательность ***LFM*** импульсов?
5. Как устроен модулятор ***LFM_QPSK***?
6. Опишите принцип работы корреляционного приемника.
7. Где применяется линейная частотная модуляция?
8. Опишите методику измерения помехоустойчивости модема.
9. Какова связь автокорреляционной функции со спектральной плотностью?
10. Для чего может быть использована автокорреляционная функция ***ACF***?

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Лукашин И.В. Исследование применения ЛЧМ-сигналов для передачи данных по радиоканалу. Электронный адрес: // http://omoled.ru/publications/view/414 (дата обращения 7.11.22).
2. Антипенский Р. Моделирование источников сложных сигналов // Журнал «Современная электроника», 2007, №9.– С. 47-49.
3. Леонидов В.В. Конспект лекций «Модуляция и демодуляция цифровых сигналов». Учебно-методический комплект по дисциплине «Цифровая обработка». МГТУ имени Н.Э. Баумана. Электронный адрес: https://leonidov.su/wp-content/uploads/2020/04/Modulation-and-Demodulation-of-Digital-Signals-Lecture-V.V.-Leonidov.pdf (дата обращения 7.11.22).
4. Речкина Д.А. Модем на основе LFM-BPSK сигналов. ВКР бакалавра. - Томск: ТУСУР, 2022.- 55 с.
5. Баранина В.Е. Модельное исследование вариантов организации разноскоростных каналов передачи в QPSK-модеме. – Томск: ТУСУР, 2020.- 53 с.
6. Гультяев, А.К. MatLab 5.3. Имитационное моделирование в среде Windows: Практическое пособие / А.К. Гультяев – СПб.: КОРОНА принт, 2001.– 400 с.
7. Черных, И.В. Simulink: среда создания инженерных приложений. / Под общ. ред. В.Г. Потемкина – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2003.– 496 с.
8. Дьяконов, В.П. MatLab 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6. Основы применения. Сер. Библиотека профессионала / В. П. Дьяконов - М.: СОЛОН-Пресс, 2005.– 800 с.
9. Дьяконов, В.П. MatLab 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6 в математике и моделировании. Сер. Библиотека профессионала / В. П. Дьяконов - М.: СОЛОН-Пресс, 2005.– 576 с.