

Министерство образования и науки РФ

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)**

Радиотехнический факультет (РТФ)

Кафедра средств радиосвязи (СРС)

Кологривов В.А.

**ИССЛЕДОВАНИЕ MSK МОДЕМА
(КЛАССИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ)**

Учебно-методическое пособие
по лабораторной работе
для студентов радиотехнических специальностей

2012

Кологривов В.А.

“Исследование MSK модема (классическая реализация)”: Учебно-методическое пособие по лабораторной работе для студентов радиотехнических специальностей. – Томск: ТУСУР. Образовательный портал, 2012. – 29 с.

Учебно-методическое пособие содержит описание функциональной модели **MSK** модема без фазового кодера (классическая реализация) выполненной в среде функционального моделирования **Simulink** системы для инженерных и научных расчетов **MatLab**.

В пособии приведены сведения из теории квадратурной фазовой модуляции и демодуляции, о преобразовании квадратурной фазовой манипуляции в частотную манипуляцию с минимальным частотным сдвигом, краткая характеристика пакета **Simulink** системы **MatLab**, подробное описание виртуального лабораторного макета и используемых блоков библиотеки **Simulink**, а также требования к экспериментальному исследованию и контрольные вопросы, ответы на которые необходимы для успешной защиты лабораторной работы.

Пособие предназначено для студентов радиотехнических специальностей по направлениям: «Радиотехника», «Телекоммуникации» и др.

АННОТАЦИЯ

Лабораторная работа “**Исследование MSK модема (классическая реализация)**” посвящена экспериментальному исследованию модема (модулятора-демодулятора) частотной манипуляции с минимальным сдвигом (без фазового кодера) цифровых систем радиосвязи с использованием пакета функционального моделирования **Simulink**.

В описании сформулирована цель лабораторной работы, приведены необходимые сведения из теории **MSK** модуляции и демодуляции о преобразовании квадратурной фазовой манипуляции в частотную манипуляцию с минимальным частотным сдвигом, краткая характеристика пакета **Simulink** системы **MatLab**, подробное описание виртуального лабораторного макета и используемых блоков библиотеки **Simulink**, а также требования к экспериментальному исследованию и контрольные вопросы, ответы на которые необходимы для успешной защиты лабораторной работы.

Исследование классической реализации модема **MSK** манипуляции (без фазового кодера) проводится по функциональной схеме, построенной на основе блоков базовых разделов библиотеки **Simulink**.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Цель работы. Краткие сведения из теории	5
2. Краткое описание пакета Simulink	9
2.1. Общая характеристика пакета Simulink	9
2.2. Запуск и работа с пакетом Simulink	9
3. Описание лабораторного макета	11
4. Описание используемых блоков библиотеки Simulink	19
5. Экспериментальное задание	27
6. Контрольные вопросы	28
Список использованных источников	29

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ

Цель работы: Изучить структуру и принцип работы классического варианта модема **MSK** частотной манипуляции с минимальным сдвигом (без фазового кодера), используемой при реализации (**MSK, GMSK**) модуляторов и демодуляторов с естественным принципом модуляции и демодуляции фазовых состояний несущей частоты.

Теоретическая часть

Функциональная **Sim**-модель варианта классической реализации **MSK** (**Minimum Shift Key**) модема частотной манипуляции с минимальным сдвигом и естественным принципом модуляции и демодуляции фазы несущей частоты приведена на рисунке 1.1.

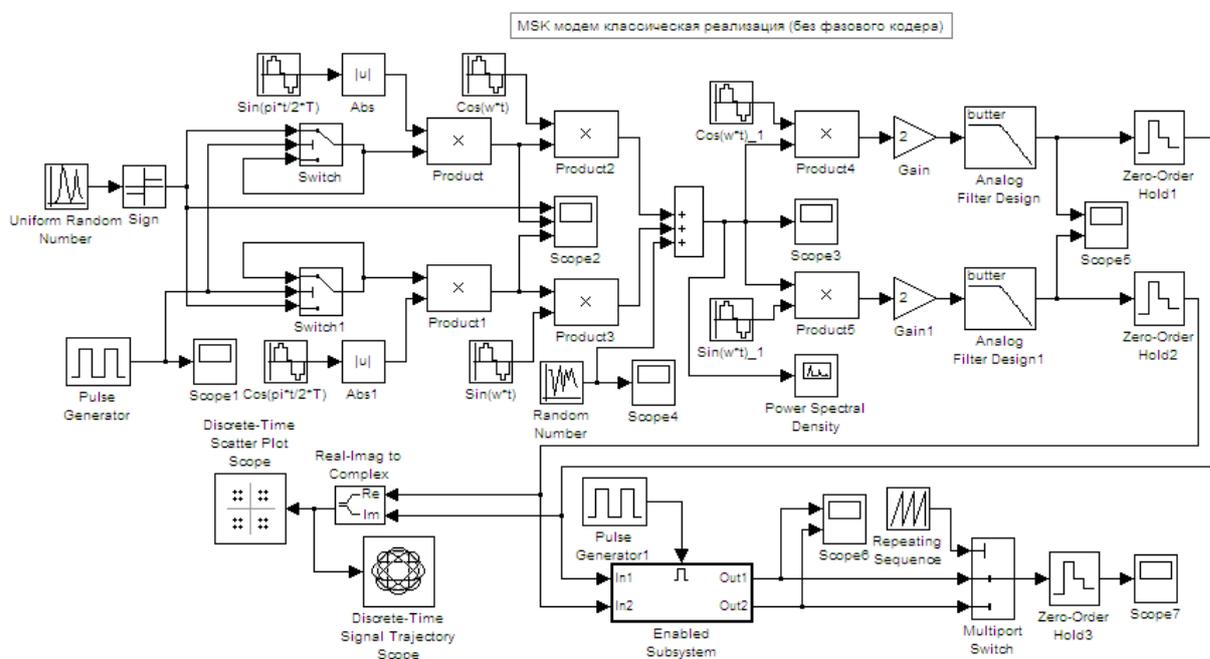


Рисунок 1.1 – Sim-модель MSK модема частотной манипуляции с минимальным сдвигом и естественным принципом модуляции и демодуляции фазовых состояний несущей частоты

Отличие данного **MSK** модулятора от *варианта реализации модулятора с фазовым кодером* заключается в том, что здесь входной поток двухполярных (± 1) битовых импульсов разбивается на два квадратурных потока импульсов длительностью $2 \cdot T$: нечетный $d_I = d_k$ (синфазный) и четный $d_Q = d_{k+1}$ (квадратурный). При таком подходе квадратурные потоки d_I и d_Q являются естественными *первичными* модулирующими импульсами. Далее, *первичные* модулирующие квадратурные импульсы преобразуются в *итоговые* модулирующие импульсы синусоидальной формы путем их

нормирования, соответственно, на $|\sin(\pi \cdot t / (2 \cdot T))|$ и на $|\cos(\pi \cdot t / (2 \cdot T))|$. Следующий этап **MSK** модуляции реализован в данном случае аппаратно, путем умножения текущих значений квадратурных составляющих несущей частоты $\cos(\omega \cdot t_k)$ и $\sin(\omega \cdot t_k)$, соответственно, на нормированные значения модулирующих импульсов $d_I \cdot |\sin(\pi \cdot t / (2 \cdot T))|$ и $d_Q \cdot |\cos(\pi \cdot t / (2 \cdot T))|$, определяющих текущее фазовое состояние. В результате в канал передачи поступает сумма фазомодулированных квадратурных составляющих несущей частоты, что соответствует аналитическому представлению **MSK** сигнала [1].

Синфазный канал:

$$\begin{aligned} d_k \cdot \left| \sin\left(\frac{\pi \cdot t}{2 \cdot T}\right) \right| \cdot \cos(\omega \cdot t) &= \frac{d_k}{2} \cdot \left\langle \sin\left(\left(\frac{\pi}{2 \cdot T} - \omega\right) \cdot t\right) + \sin\left(\left(\frac{\pi}{2 \cdot T} + \omega\right) \cdot t\right) \right\rangle = \\ &= \frac{d_k}{2} \cdot \left\langle \sin\left(\left(\omega + \frac{\pi}{2 \cdot T}\right) \cdot t\right) - \sin\left(\left(\omega - \frac{\pi}{2 \cdot T}\right) \cdot t\right) \right\rangle, \end{aligned}$$

квадратурный канал:

$$\begin{aligned} d_{k+1} \cdot \left| \cos\left(\frac{\pi \cdot t}{2 \cdot T}\right) \right| \cdot \sin(\omega \cdot t) &= \frac{d_{k+1}}{2} \cdot \left\langle \sin\left(\left(\omega - \frac{\pi}{2 \cdot T}\right) \cdot t\right) + \sin\left(\left(\omega + \frac{\pi}{2 \cdot T}\right) \cdot t\right) \right\rangle = \\ &= \frac{d_{k+1}}{2} \cdot \left\langle \sin\left(\left(\omega + \frac{\pi}{2 \cdot T}\right) \cdot t\right) + \sin\left(\left(\omega - \frac{\pi}{2 \cdot T}\right) \cdot t\right) \right\rangle, \end{aligned}$$

суммарный канал передачи:

$$\begin{aligned} d_k \cdot \left| \sin\left(\frac{\pi \cdot t}{2 \cdot T}\right) \right| \cdot \cos(\omega \cdot t) + d_{k+1} \cdot \left| \cos\left(\frac{\pi \cdot t}{2 \cdot T}\right) \right| \cdot \sin(\omega \cdot t) &= \\ &= \pm \sin\left(\left(\omega \pm \frac{\pi}{2 \cdot T}\right) \cdot t\right), \end{aligned}$$

где $d_k, d_{k+1} = \pm 1$ - амплитуды нечетных и четных импульсов квадратурных каналов; ω - круговая частота несущей; T - длительность бита исходной последовательности. Из полученных соотношений следует, в зависимости от сочетания знаков (d_k, d_{k+1}) получаем двухпозиционную или бинарную частотную манипуляцию **BFSK** с минимальным частотным сдвигом или **MSK**. Так при значениях амплитуд нечетных и четных импульсов $(d_k, d_{k+1}) = (+1, +1)$ и $(d_k, d_{k+1}) = (-1, -1)$ частота несущей определяется выражением $\omega_n = \omega + \pi / (2 \cdot T)$, а при значениях $(d_k, d_{k+1}) = (+1, -1)$ и $(d_k, d_{k+1}) = (-1, +1)$ частота несущей равна $\omega_n = \omega - \pi / (2 \cdot T)$.

Таким образом, четырехпозиционная квадратурная фазовая модуляция (**OQSK**) при синусоидальной форме модулирующих импульсов соответствует двухпозиционной частотной манипуляции с минимальным сдвигом (**MSK**).

Модуляция **MSK** является модуляцией с постоянной огибающей несущей частоты без кратковременных провалов уровня сигнала. Это позволяет использовать в трактах передачи высокоэкономичные усилители мощности класса **C**. Использование плавных переходов между фазовыми состояниями увеличивает необходимую полосу пропускания трактов примерно в **1.5** раза, зато позволяет значительно снизить уровень внеполосных излучений. Так при **MSK** модуляции обеспечивается спад боковых составляющих спектральной плотности порядка $1/f^4$, тогда как при **QPSK**, **OQPSK** и $\pi/4$ -**PSK** спад порядка $1/f^2$.

MSK модулятор, соответствующий частотной модуляции с минимальным частотным сдвигом может быть представлен в виде функциональной схемы (см. рисунок 1.2.).

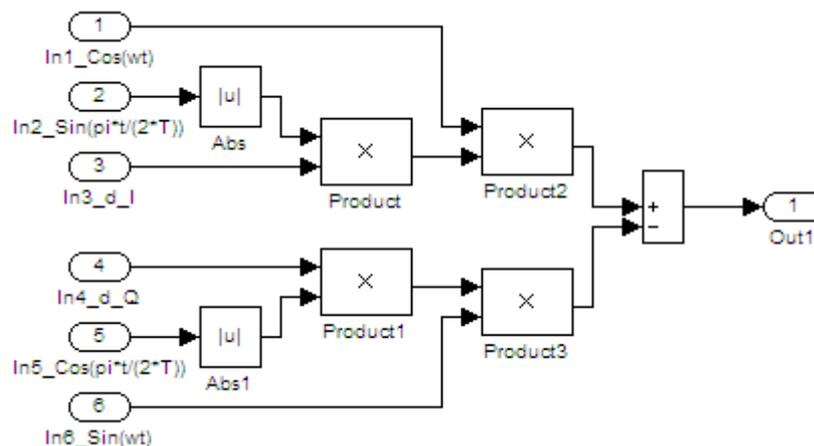


Рисунок 1.2 – Функциональная схема **MSK** манипулятора с естественным принципом модуляции фазовых состояний несущей

Здесь на входы **In1** и **In6** поступают квадратурные колебания несущей частоты $\cos(\omega \cdot t_k)$ и $\sin(\omega \cdot t_k)$, на входы **In2** и **In5** подаются сигналы опорных генераторов с частотой девиации, изменяющиеся по законам $\sin(\pi \cdot t_k / (2 \cdot T))$ и $\cos(\omega \cdot t_k / (2 \cdot T))$, а на входы **In3** и **In4** поступают квадратурные модулирующие импульсы d_I и d_Q . С выхода сумматора в канал передачи поступает сумма фазоманипулированных квадратурных составляющих, что соответствует частотной манипуляции с минимальным сдвигом или **MSK** модуляции.

Описанный принцип работы **MSK** модулятора без фазового кодера используется при реализации (**MSK**, **GMSK**) модуляторов, функционирующих по естественному принципу кодирования фазовых

состояний несущей частоты. Данный принцип построения модуляторов, однако, не переносится на общий случай **M**-арной фазовой манипуляции **8_PSK, 16_PSK, 32_PSK, 64_PSK** и так далее.

Демодуляция принятого квадратурно-фазоманипулированного сигнала на несущей частоте в данном случае осуществляется путем разветвления его на квадратурные каналы и подачи на первые входы умножителей. На вторые входы умножителей поступают синхронизированные опорные косинусоидальные $\cos(\omega \cdot t_k)$ и синусоидальные $\sin(\omega \cdot t_k)$ колебания несущей частоты. Фильтры нижних частот (**ФНЧ**), стоящие на выходах умножителей, отфильтровывают составляющие на второй гармонике несущей частоты и выделяют изменения постоянной составляющей, пропорциональные значениям модулирующих импульсов $d_I \cdot |\sin(\pi \cdot t / (2 \cdot T))|$ и $d_Q \cdot |\cos(\pi \cdot t / (2 \cdot T))|$ квадратурных каналов.

Принятие решения о принимаемых значениях модулирующих импульсов реализуется блоками определения знака сигнала, что соответствует нулевому пороговому значению.

Двухканальный переключатель управляемый опорным генератором тактовых импульсов, осуществляя поочередную выборку с выходов блоков принятия решений квадратурных каналов, восстанавливает требуемый вид принятой импульсной последовательности.

Математическая запись процесса демодуляции может быть представлена в виде:

синфазный канал -

$$\begin{aligned} \pm \sin\left(\left(\omega \pm \frac{\pi}{2 \cdot T}\right) \cdot t\right) \cdot \cos(\omega \cdot t) &= \pm \frac{1}{2} \cdot \left\langle \sin\left(\pm \frac{\pi \cdot t}{2 \cdot T}\right) + \sin\left(\left(2 \cdot \omega \pm \frac{\pi}{2 \cdot T}\right) \cdot t\right) \right\rangle \Rightarrow \\ \Rightarrow \pm \frac{1}{2} \cdot \sin\left(\pm \frac{\pi \cdot t}{2 \cdot T}\right) &= d_k = d_I, \end{aligned}$$

квадратурный канал -

$$\begin{aligned} \pm \sin\left(\left(\omega \pm \frac{\pi}{2 \cdot T}\right) \cdot t\right) \cdot \sin(\omega \cdot t) &= \pm \frac{1}{2} \cdot \left\langle \cos\left(\pm \frac{\pi \cdot t}{2 \cdot T}\right) - \cos\left(\left(2 \cdot \omega \pm \frac{\pi}{2 \cdot T}\right) \cdot t\right) \right\rangle \Rightarrow \\ \Rightarrow \pm \frac{1}{2} \cdot \cos\left(\pm \frac{\pi \cdot t}{2 \cdot T}\right) &= d_{k+1} = d_Q. \end{aligned}$$

Здесь вторые слагаемые в формулах тригонометрических преобразований на выходах **ФНЧ** дают нулевой вклад за счет фильтрации. Математически это означает, что интегралы от тригонометрических функций на интервале дибита дают нули

$$\int_0^{2\cdot T} \sin\left(\left(2\cdot\omega \pm \frac{\pi}{4}\right)\cdot t\right) dt = 0, \quad \int_0^{2\cdot T} \cos\left(\left(2\cdot\omega \pm \frac{\pi}{4}\right)\cdot t\right) dt = 0.$$

Таким образом, нами дано математическое описание работы классического варианта модема с **MSK** модуляцией (без фазового кодера), используемой при реализации (**MSK, GMSK**) модуляторов и демодуляторов с естественным принципом модуляции и демодуляции фазовых состояний несущей частоты.

2 КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ПАКЕТА SIMULINK

2.1 Общая характеристика пакета Simulink

Пакет **Simulink** разрабатывается компанией **Mathworks** (www.mathworks.com) 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 [2, 3, 4, 5].

2.2 Запуск и работа с пакетом Simulink

Для запуска системы **Simulink** необходимо предварительно выполнить запуск системы **MatLab**. После открытия командного окна системы **MatLab** нужно запустить систему **Simulink**. Это можно сделать одним из трех способов:

- нажать кнопку  (**Simulink**) на панели инструментов системы **MatLab**;
- в строке командного окна **MatLab** напечатать **Simulink** и нажать клавишу **Enter**;
- выполнить опцию **Open** в меню **File** 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**).

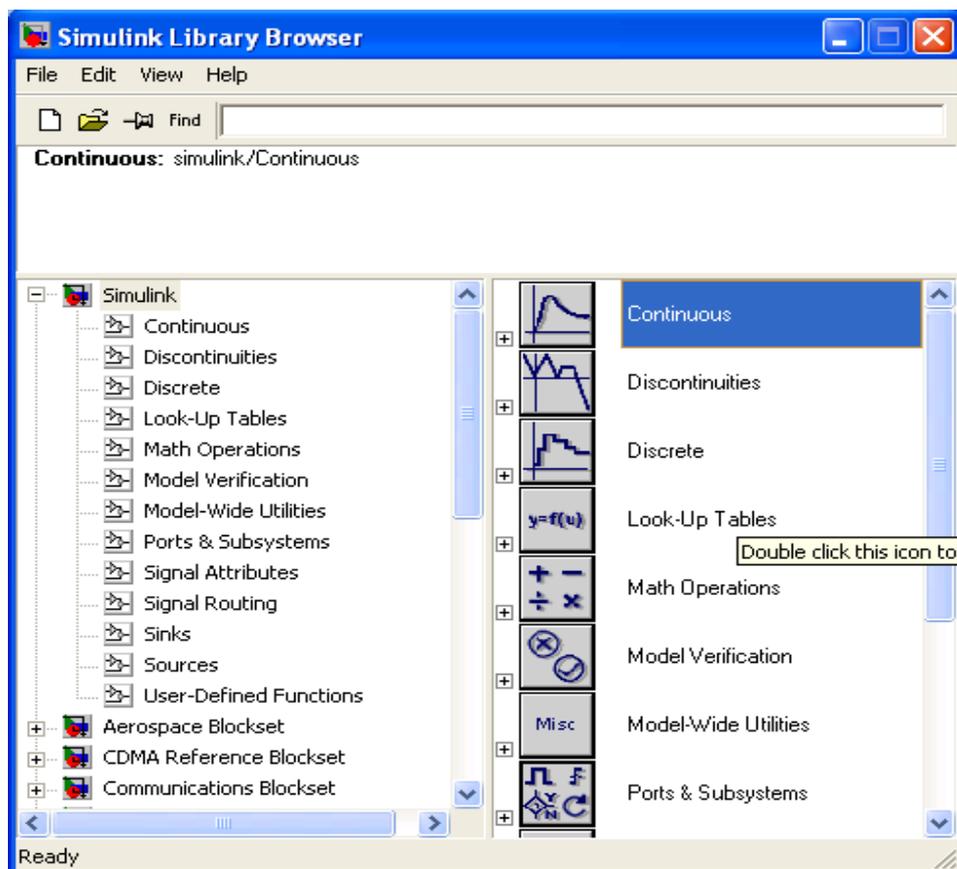


Рисунок 2.1. – Библиотека блоков **Simulink Library Browser**

На рисунке 2.1 выведена библиотека системы **Simulink** (в левой части окна) и показаны ее разделы (в правой части окна). Основная библиотека системы содержит следующие разделы:

- **Continuous** – блоки аналоговых элементов;
- **Discontinuous** – блоки нелинейных элементов;
- **Discrete** – блоки дискретных элементов;
- **Look-Up Tables** – блоки таблиц;
- **Math Operations** – блоки элементов, определяющие математические операции;
- **Model Verification** – блоки проверки свойств сигнала;
- **Model-Wide Utilities** – раздел дополнительных утилит;
- **Port&Subsystems** – порты и подсистемы;
- **Signal Attributes** – блоки задания свойств сигналов;
- **Signal Routing** – блоки маршрутизации сигналов;
- **Sinks** – блоки приема и отображения сигналов;
- **Sources** – блоки источников сигнала;
- **User-Defined Function** – функции, определяемые пользователем.

Список разделов библиотеки представлен в виде дерева, и правила работы с ним являются общими для списков такого вида: пиктограмма

свернутого узла дерева содержит символ «+», а пиктограмма развернутого – символ «-».

Для того чтобы развернуть или свернуть узел дерева, достаточно щелкнуть на его пиктограмме левой клавишей мыши (*ЛКМ*). При выборе соответствующего раздела библиотеки его содержимое отображается в правой части окна.

При работе элементы разделов библиотек "**перетаскивают**" в рабочую область удержанием *ЛКМ* на соответствующих изображениях. Для соединения элементов достаточно указать курсором мыши на начало соединения и затем при нажатии левой кнопки мыши протянуть соединение в его конец.

При двойном щелчке *ЛКМ* на выделенном блоке всплывает меню, в котором задаются параметры блоков.

Работа **Simulink** происходит на фоне открытого окна системы **MatLab**, закрытие которого приведёт к выходу из **Simulink**.

3. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО МАКЕТА

Приведем краткое описание работы **MSK** модема частотной манипуляции с минимальным сдвигом и естественным принципом модуляции и демодуляции фазовых состояний несущей частоты на основе **Sim**-модели представленной на рисунке 1.1.

Входной поток данных реализуется блоком источника случайного сигнала с равномерным распределением (**Uniform Ran** о преобразовании квадратурной фазовой манипуляции в частотную манипуляцию с минимальным частотным сдвигом **dom Number**), на выходе которого включен блок определения знака сигнала (**Sign**). Изменяя параметры блока источника **Initial seed** и **Sample time**, задаем вид случайной последовательности и длительность импульсов.

С выхода схемы формирования входной импульсной последовательности сигнал поступает на формирователь *первичных* квадратурных модулирующих импульсов **MSK** манипулятора. Формирователь *первичных* модулирующих импульсов реализован на основе двух переключателей (**Switch** и **Switch1**), управляемых опорным тактовым генератором прямоугольных импульсов (**Pulse Generator**) с периодом равным дибиту и скважностью 2. Поочередная работа переключателей разделяет входной поток импульсов на последовательности нечетных (синфазных) и четных (квадратурных) импульсов. Расширение вдвое импульсов квадратурных последовательностей реализуется в данном случае обратными связями (подачей импульсов с выходов переключателей на неактивные входные порты). С выходов переключателей квадратурные модулирующие импульсы подаются на схему квадратурного модулятора.

Отметим, что поочередная работа переключателей приводит к тому, что квадратурная последовательность модулирующих импульсов оказывается смещенной на один бит относительно синфазной

последовательности. Такое смещение модулирующих последовательностей импульсов соответствует **OQPSK** модуляции. **MSK** модулятор отличается от **QPSK** или **OQPSK** модулятора тем, что на входе **MSK** модулятора присутствует преобразователь формы модулирующих импульсов из прямоугольной в синусоидальную.

Преобразователь *первичных* прямоугольных модулирующих импульсов в *итоговые* модулирующие импульсы синусоидальной формы реализован на основе умножителей (**Product** и **Product1**). На первые входы умножителей подаются квадратурные модулирующие последовательности прямоугольных импульсов d_I и d_Q , а на вторые входы умножителей поступают сигналы с опорных генераторов частоты девиации, изменяющиеся по законам $|\sin(\pi \cdot t_k / (2 \cdot T))|$ и $|\cos(\omega \cdot t_k / (2 \cdot T))|$ (блоки **Sin(wt/(2*T))** и **Cos(wt/(2*T))**). С выходов преобразователя формы модулирующих импульсов сигналы поступают на входы обычного квадратурного фазового модулятора.

Квадратурный фазовый модулятор реализован на основе умножителей (**Product2** и **Product3**), на первые входы которых подаются квадратурные модулирующие последовательности синусоидальных импульсов, а на вторые входы умножителей поступают сигналы с опорных генераторов несущей частоты, изменяющиеся по законам $\cos(\omega \cdot t_k)$ и $\sin(\omega \cdot t_k)$ (блоки **Cos(wt)** и **Sin(wt)**). Выходным блоком модулятора является блок сумматора (**Sum**).

Этот же блок сумматора, на третий вход которого подается случайная импульсная последовательность (блок **Random Number**) используется в качестве имитатора шумов канала передачи.

Сигнал с имитатора канала передачи подается на вход демодулятора, реализованного двумя умножителями (**Product4** и **Product5**), на первые входы которых подается принятый сигнал, а на вторые входы умножителей поступают сигналы с опорных генераторов несущей частоты, изменяющиеся по законам $\cos(\omega \cdot t_k)$ и $\sin(\omega \cdot t_k)$ (блоки **Cos(wt)_1** и **Sin(wt)_1**). С выходов умножителей сигналы усиливаются блоками **Gain** и **Gain1** и поступают на **ФНЧ** (блоки **Analog Filter Design** и **Analog Filter Design1**), которые отфильтровывают высокочастотные составляющие сигналов умножителей. Низкочастотные составляющие спектра сигналов умножителей, пропорциональные принятым синусоидальным модулирующим квадратурным импульсам подаются для предварительного сглаживания на необязательные блоки экстраполяторов нулевого порядка (**Zero-Order Hold1** и **Zero-Order Hold2**). Далее сглаженные модулирующие импульсы поступают на схему принятия решений.

Схема принятия решений реализована на основе двухканального блока подсистемы **Enabled Subsystem** управляемого опорным генератором прямоугольных импульсов (**Pulse Generator1**). Блоками принятия решений каждого канала являются встроенные блоки **Sign1** и **Sign2**, реализующие нулевой порог. С выхода схемы принятия решений, регенерированные

прямоугольные модулирующие импульсы (дибиты) поступают на вход схемы восстановления исходной последовательности импульсов (битов).

Схема восстановления исходной последовательности импульсов (битов) по принятым квадратурным модулирующим импульсам (дибитам) реализована на основе двухпортового переключателя (**Multiport Switch**) и управляемого генератором пилообразного напряжения (**Repeating Sequence**). Поочередная выборка отсчетов из квадратурных двухбитовых последовательностей восстанавливает принятую последовательность битов цифрового сигнала. На выходе схемы восстановления для исключения нежелательных скачков включен блок экстраполятора нулевого порядка (**Zero-Order Hold3**).

Схема восстановления исходной последовательности импульсов может быть реализована на основе простого переключателя (**Switch**), управляемого опорным генератором прямоугольных импульсов (**Pulse Generator**) с периодом равным дибиту и скважностью 2.

Схему принятия решений о принимаемых значениях импульсов можно реализовать блоком **Sign** не до, а после схемы восстановления принятой последовательности импульсов.

Для визуализации работы **MSK** модема с естественным принципом модуляции и демодуляции фазовых состояний приведены осциллограммы блоков осциллографов (**Scope**), подключенных к узловым точкам функциональной модели, и, отображающие основные этапы преобразования сигнала в модуляторе и демодуляторе. Приведены осциллограммы блока отображения спектральной плотности мощности (**Power Spectral Density**) из подраздела **Additional Sinks** раздела **Simulink Extras** библиотеки **Simulink** [4], визуализирующие спектральные характеристики мощности **MSK** сигнала. Кроме того, представлены диаграммы рассеяния и переходов фазовых состояний сигнала за счет влияния полосы пропускания и помех тракта передачи, отображаемые блоками **Discrete-Time Scatter Plot Scope** и **Discrete-Time Signal Trajectory Scope** из подраздела **Comm Sinks** раздела **Communication Blockset** библиотеки **Simulink** [5].

На рисунке 3.1 приведена осциллограмма последовательности прямоугольных импульсов длительностью равной биту и скважностью 2, формируемая опорным тактовым генератором, управляющим переключателями формирователя квадратурных последовательностей модулирующих импульсов.

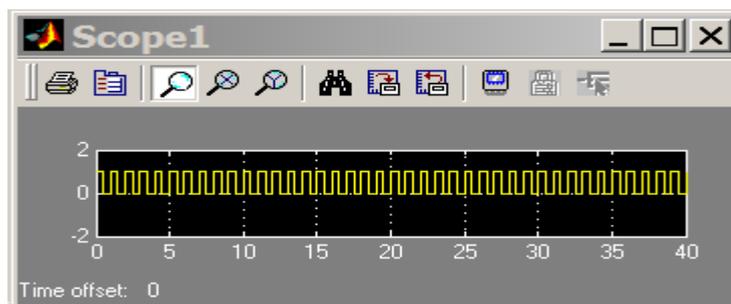


Рисунок 3.1 – Осциллограмма последовательности прямоугольных импульсов, формируемая опорным тактовым генератором

На рисунке 3.2 приведены осциллограммы входной импульсной последовательности, сформированной источником случайного сигнала с равномерным распределением и блоком определения знака сигнала, а также нечетной и четной последовательностей расширенных вдвое и нормированных, соответственно, на $|\sin(\pi \cdot t / (2 \cdot T))|$ и $|\cos(\pi \cdot t / (2 \cdot T))|$ импульсов формирователя квадратурных модулирующих импульсов модулятора MSK.

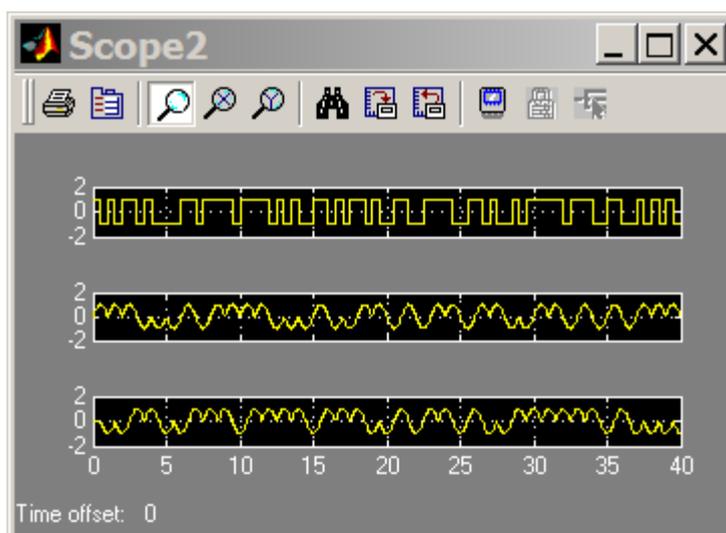


Рисунок 3.2 – Осциллограммы входной импульсной последовательности, нечетной и четной последовательностей импульсов нормированных, соответственно, на $|\sin(\pi \cdot t / (2 \cdot T))|$ и $|\cos(\pi \cdot t / (2 \cdot T))|$, формирователя квадратурных модулирующих импульсов модулятора MSK

На рисунке 3.3. приведена осциллограмма принятого фазоманипулированного MSK сигнала на несущей частоте.

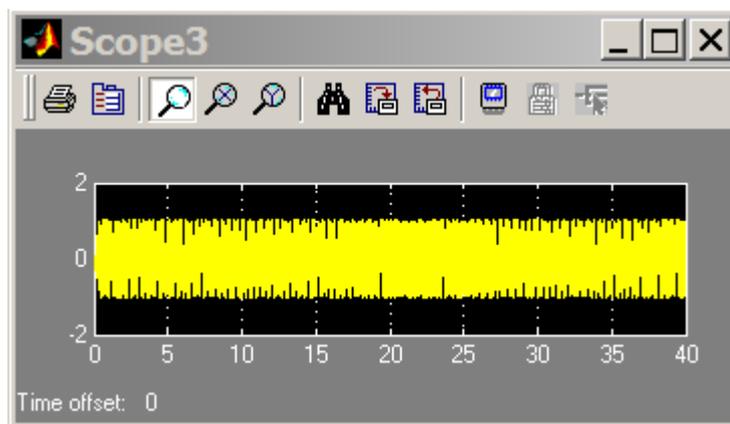


Рисунок 3.3 – Осциллограмма принятого фазоманипулированного MSK сигнала на несущей частоте

На рисунке 3.4 приведена осциллограмма случайной импульсной последовательности имитатора шумов канала передачи - блока **Random Number** (источника случайного сигнала с нормальным распределением уровня).

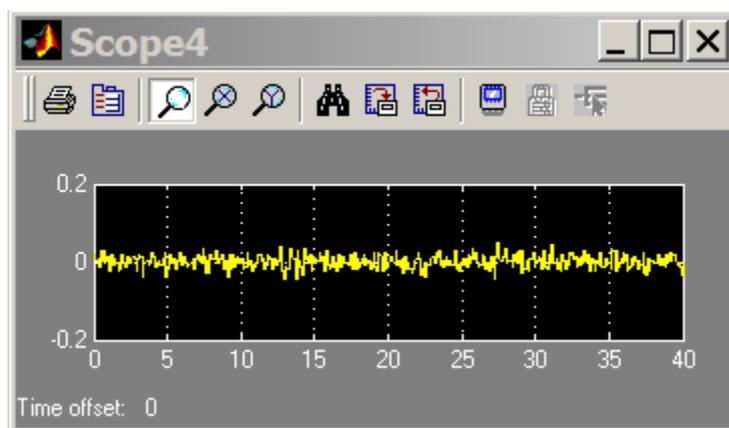


Рисунок 3.4 – Осциллограмма случайной импульсной последовательности имитатора шумов канала передачи (блока **Random Number**)

На рисунке 3.5 приведены осциллограммы сигналов на выходах **ФНЧ** демодулятора, соответствующих принятым модулирующим импульсам квадратурных каналов **MSK** модулятора.

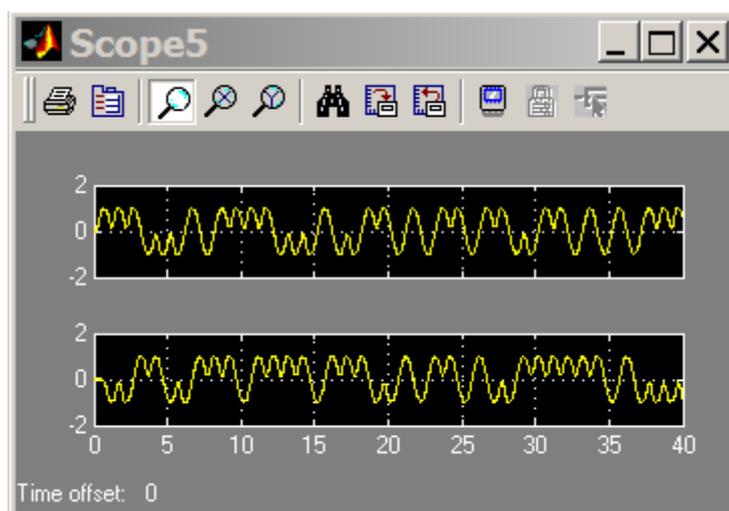


Рисунок 3.5 – Осциллограммы сигналов на выходах **ФНЧ** демодулятора, соответствующих принятым модулирующим импульсам квадратурных каналов **MSK** модулятора

На рисунке 3.6 приведены осциллограммы принятых и восстановленных схемой принятия решений первичных прямоугольных импульсов квадратурных каналов.

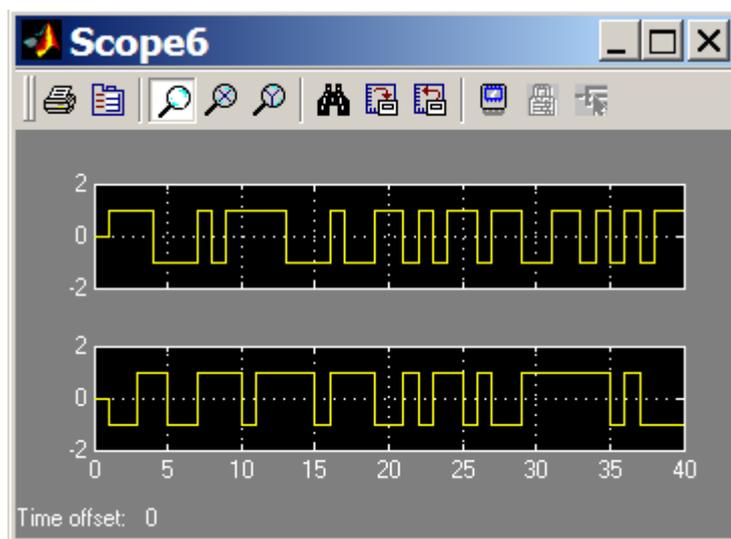


Рисунок 3.6 – Осциллограммы принятых и восстановленных схемой принятия решений первичных прямоугольных импульсов квадратурных каналов

На рисунке 3.7 приведена осциллограмма принятого сигнала на выходе схемы восстановления исходной последовательности импульсов по квадратурным последовательностям схемы принятия решений демодулятора.

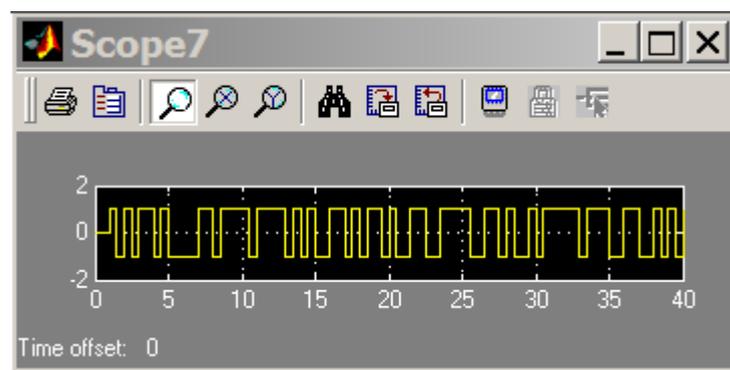


Рисунок 3.7 – Осциллограммы принятого сигнала на выходе схемы восстановления исходной последовательности импульсов

На рисунке 3.8 приведены осциллограммы блока отображения спектральной плотности мощности (**Power Spectral Density**) из подраздела **Additional** раздела **Sinks Simulink Extras** библиотеки **Simulink** [4]. Окно анализатора спектра содержит три графика: - временной зависимости входного сигнала; - амплитудно-частотной зависимости спектральной плотности мощности входного сигнала; фазо-частотной зависимости спектра мощности входного сигнала. Осциллограммы блока **Power Spectral Density** позволяют оценить эффективность использования полосы пропускания исследуемого типа фазовой манипуляции, в данном случае **MSK** модуляции.

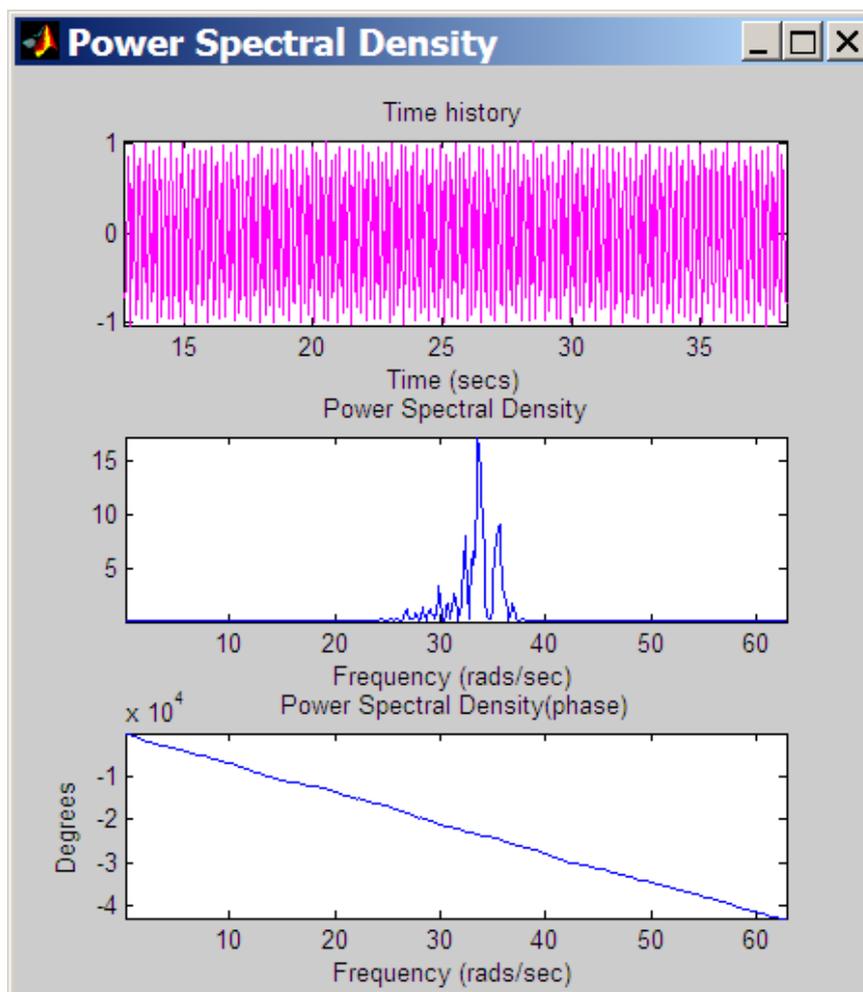


Рисунок 3.8 – Осциллограммы блока отображения спектральной плотности мощности (Power Spectral Density)

Как известно ширина полосы пропускания необходимая для обеспечения цифровой связи определяется длиной битовой посылки. Чем короче битовый импульс, тем шире полоса частот, занимаемая его спектром, в частности, основным лепестком. Кроме того, с точки зрения интерференционных помех важна скорость спадаения уровней боковых лепестков спектральной характеристики. Ширина основного лепестка и скорость спадаения уровней боковых лепестков существенно зависят от формы импульса. Наиболее узкий основной лепесток имеет прямоугольная форма импульса, однако при этом скорость затухания уровня боковых лепестков мала и пропорциональна $1/f$ (для спектральной плотности $1/f^2$). При косинусоидальной форме импульса скорость спадаения уровня боковых лепестков пропорциональна $1/f^2$ (для спектральной плотности $1/f^4$), однако ширина бокового лепестка примерно в **1.5** раза шире, чем у прямоугольного импульса. Для обеспечения компромисса между шириной бокового лепестка и скоростью спадаения уровней боковых лепестков косинусоидальные импульсы нормируют гауссовским фильтром, что используется в **GMSK** модуляции.

Основным достоинством квадратурной фазовой манипуляции является *удвоение* длительности модулирующих импульсов квадратурных каналов, то есть *снижение требуемой скорости передачи битов вдвое*, а, следовательно, *сокращение требуемой полосы пропускания канала вдвое*.

Использование в **MSK** модуляции косинусоидальной формы модулирующих импульсов приводит к плавному изменению фазы несущей частоты, что эквивалентно манипуляции частоты несущей на $\pm \frac{\pi}{2 \cdot T}$ рад/сек.

MSK сигнал, в силу отсутствия скачков фазовых состояний, является сигналом с постоянной несущей, имеющим максимальную скорость спадаания уровней боковых лепестков и, соответственно, минимальный уровень интерференционных помех.

На рисунках 3.9 - 3.10 приведены диаграммы рассеяния и перехода фазовых состояний **MSK** сигнала за счет влияния полосы пропускания и помех тракта передачи, отображаемые блоками **Discrete-Time Scatter Plot Scope** и **Discrete-Time Signal Trajectory Scope** из подраздела **Comm Sinks** раздела **Communication Blockset** библиотеки **Simulink** [5].

Диаграммы блоков **Discrete-Time Scatter Plot Scope** и **Discrete-Time Signal Trajectory Scope** позволяют оценить влияние *метода модуляции, полосы пропускания и шумов канала передачи* на рассеяние и переходы фазовых состояний принятого сигнала.

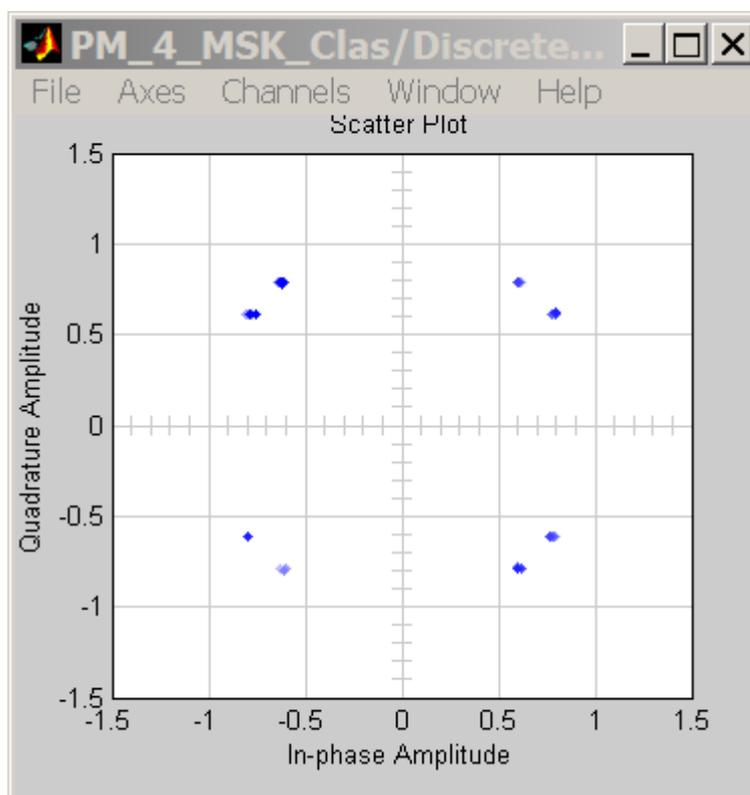


Рисунок 3.9 – Диаграмма рассеяния фазовых состояний сигнала за счет влияния метода модуляции, полосы пропускания и помех тракта передачи, отображаемая блоком **Discrete-Time Scatter Plot Scope**

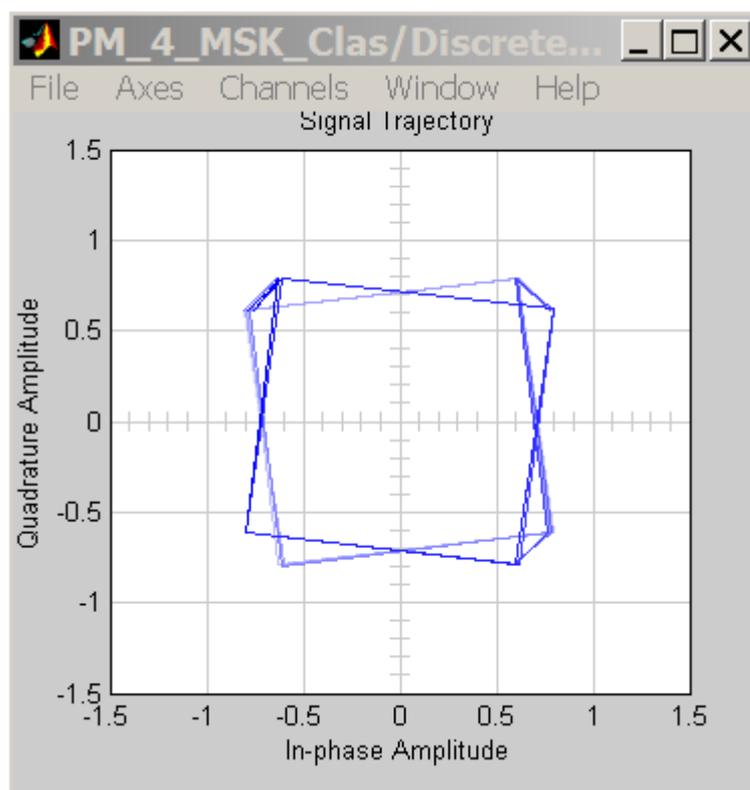


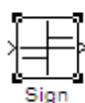
Рисунок 3.10 – Диаграмма траекторий фазовых состояний сигнала за счет влияния метода модуляции, полосы пропускания и помех тракта передачи, отображаемая блоком Discrete-Time Signal Trajectory Scope

4. ОПИСАНИЕ ИСПОЛЬЗУЕМЫХ БЛОКОВ БИБЛИОТЕКИ SIMULINK

Ниже описаны основные блоки базовых разделов библиотеки **Simulink** [2, 3, 4, 5], используемые в функциональной схеме классического варианта модема квадратурной фазовой манипуляции, с естественным принципом модуляции и демодуляции фазовых состояний несущей частоты.



Uniform Random Number – источник случайного дискретного сигнала с нормальным распределением. *Назначение:* формирование случайного сигнала с равномерным распределением уровня. *Параметры блока:* **Minimum** – минимальный уровень сигнала; **Maximum** – максимальный уровень сигнала; **Initial seed** – начальное значение генератора случайного сигнала; **Sample time** – такт дискретности.



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

$$\text{sign}(x) = \begin{cases} -1 & \text{if } x < 0, \\ 0 & \text{if } x = 0, \\ 1 & \text{if } x > 0. \end{cases}$$

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



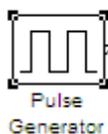
Switch – блок переключателя. *Назначение:* переключение входных сигналов по сигналу управления. *Параметры блока:* **Criteria for passing first input** – условие прохождения сигнала с первого входа, значение выбирается из списка: **u2>=Threshold** – сигнал управления больше или равен пороговому значению; **u2>Threshold** – сигнал управления больше порогового значения; **u2~=Threshold** – сигнал управления не равен пороговому значению. **Threshold** – порог; флажок **Show additional parameters** – показать дополнительные параметры. При выставленном флажке отображаются дополнительные окна списков, в нашем случае флажок не используется.



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.



Abs – блок вычисления модуля. *Назначение:* вычисление абсолютного значения величины сигнала. *Параметры блока:* флажок **Saturate on integer overflow** – подавлять переполнение целого, при выставленном флажке ограничение сигналов целого типа выполняется корректно; флажок **Enable zero crossing detection** – фиксировать прохождение сигнала через нулевой уровень. Блок **Abs** может использоваться для вычисления модуля комплексного сигнала.



Pulse generator – блок источника импульсного сигнала. *Назначение:* формирование сигнала в форме прямоугольных

импульсов. *Параметры блока:* **Pulse Type** – способ формирования сигнала, может принимать два значения: **Time-based** – по текущему времени; **Sample-based** – по величине такта дискретности и количеству шагов моделирования. Вид окна параметров зависит от выбранного способа формирования сигнала. **Amplitude** – амплитуда; **Period** – период, задается в секундах при способе **Time-based** или количеством тактов при способе **Sample-based**; **Pulse width** – ширина импульса, задается в процентах от периода при способе **Time-based** или количеством тактов при способе **Sample-based**; **Phase delay** – фазовая задержка, задается в секундах при способе **Time-based** или количеством тактов при способе **Sample-based**; **Sample time** – такт дискретности; флажок **Interpret vector parameters as 1 - D** – интерпретировать вектор как массив скаляров.



Sine Wave – блок источника синусоидального сигнала. *Назначение:* формирование синусоидального сигнала с заданной частотой, амплитудой, фазой и смещением. *Параметры блока:* **Sine Type** – способ формирования сигнала реализуется двумя алгоритмами: **Time-based** – по текущему времени (для аналоговых систем) или по значению сигнала на предыдущем шаге и величине такта дискретности (для дискретных систем); **Sample-based** – по величине такта дискретности и количеству расчетных шагов на один период синусоидального сигнала. Вид окна задания параметров меняется в зависимости от выбранного способа формирования синусоидального сигнала.

Выходной сигнал источника в режиме **Time-based** (по текущему значению времени для аналоговых систем) определяется выражением

$$y = Amplitude \cdot \sin(frequency \cdot time + phase) + bias .$$

Параметры блока в режиме Time-based: **Amplitude** – амплитуда; **Bias** – постоянная составляющего сигнала (смещение); **Frequency (rads/sec)** – частота (рад/с); **Phase (rads)** – начальная фаза (рад); **Sample time** – такт дискретности, используется для получения дискретной выборки из непрерывного сигнала и может принимать следующие значения: **0** (по умолчанию) – используется при моделировании непрерывных систем; **> 0** (положительное значение) – задается при моделировании дискретных систем; **-1** (минус один) – такт дискретности устанавливается таким же, как и в предшествующем блоке. Данный параметр может задаваться для многих блоков библиотеки **Simulink**. Флажок **Interpreted vector parameters as 1 - D** – интерпретировать вектор как массив скаляров. Для очень больших значений времени точность вычисления значений сигнала падает.

Выходной сигнал источника в режиме **Time-based** (по текущему значению времени для дискретных систем) определяется матричным выражением

$$\begin{bmatrix} \sin(t + \Delta t) \\ \cos(t + \Delta t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\Delta t) & \sin(\Delta t) \\ -\sin(\Delta t) & \cos(\Delta t) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sin(t) \\ \cos(t) \end{bmatrix},$$

где Δt - постоянная величина, равная значению **Sample time**. В данном режиме ошибка округления для больших значений времени меньше, чем в предыдущем режиме.

Выходной сигнал источника в режиме **Time-based (по количеству тактов на период для дискретных систем)** определяется выражением

$$y = A \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot k \cdot f \cdot T + \varphi) + b = A \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot k + l) / N + b,$$

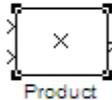
где A - амплитуда сигнала; f - частота сигнала в Гц; T - такт дискретности; N - количество тактов в секунду; k - номер текущего шага, $k = 0, \dots, N - 1$; φ - начальная фаза сигнала; l - начальная фаза, заданная количеством тактов; b - постоянная составляющая (смещение) сигнала.

*Параметры блока в режиме **Sample-based**:* **Amplitude** – амплитуда; **Bias** – постоянная составляющего сигнала (смещение); **Samples per period** – количество тактов на один период синусоидального сигнала:

$$N = \text{Samples per second} = 1 / (f \cdot T);$$

$$p = \text{Samples per period} = 2 \cdot \pi \cdot N.$$

Number of offset samples – начальная фаза сигнала, задается количеством тактов дискретности $l = \varphi \cdot p / (2 \cdot \pi)$. **Sample time** – такт дискретности. Флажок **Interpret vector parameters as 1 - D** – интерпретировать вектор как одномерный. В данном режиме ошибка округления не накапливается, поскольку **Simulink** начинает отсчет номера текущего шага с нуля для каждого периода.



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.

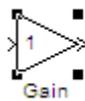


Sum – блок сумматора. *Назначение:* вычисление алгебраической суммы текущих значений входных сигналов. *Параметры блока:* **Icon shape** – форма блока, выбирается из списка: **round** – круг; **rectangular** – прямоугольник. **List of sign** – список знаков из набора: + - плюс; - - минус, | - делитель. 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.

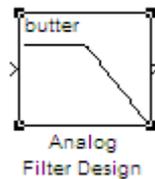


Random Number – источник случайного сигнала с нормальным распределением уровня. *Назначение:* формирование сигнала с равномерным распределением уровня. Параметры блока: **Mean** – среднее значение; **Variance** – дисперсия; **Initial seed** – Начальное значение генератора случайного сигнала; **Sample time** – такт дискретности; флажок **Interpreted vector parameters as 1 – D** – интерпретировать вектор как массив скаляров. В нашем случае блок используется для моделирования шумов канала передачи данных.

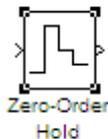


Gain – блок усилителя. *Назначение:* блок **Gain** умножает входной сигнал на постоянный коэффициент; *Параметры блока:* **Multiplication** – способ выполнения операции, значение параметра выбирается из списка: **Element-wise $K*u$** – поэлементный; **Matrix $K*u$** – матричный, коэффициент усиления 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.

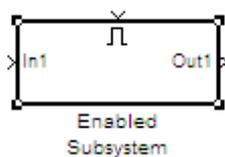
Блоки **Gain** и **Matrix Gain** по сути есть один и тот же блок, но с разными начальными установками параметра **Multiplication**. Для векторного входного сигнала **u** и параметра **Gain** в виде вектора-строки **K**, при способе выполнения операции **Element-wise $K*u$** получаем вектор покомпонентного умножения векторов **K*u**, а при способе выполнения операции **Matrix $K*u$** получаем скалярное произведение векторов **K*u**. Параметр блока **Gain** может быть положительным или отрицательным, как больше, так и меньше единицы. Коэффициент усиления можно задавать в виде скаляра, матрицы, вектора или вычисляемого выражения. Если входной сигнал действительного типа, а коэффициент усиления комплексный, то выходной сигнал будет комплексным. В случае отличия типа входного сигнала от типа коэффициента усиления **Simulink** пытается выполнить приведение типа усиления к типу входного сигнала и выдает сообщение об ошибке, если такое приведение невозможно.



Analog Filter Design – блок аналогового фильтра заданного метода проектирования и типа из подраздела **Filter Design**; подраздела **Filtering**, раздела **DSP Blockset** библиотеки **Simulink** [4]. *Назначение:* аналоговая фильтрация низкочастотных составляющих спектра входного сигнала. *Параметры блока:* **Design method** – метод проектирования, выбирается из списка: **Butterworth** – фильтр Баттерворта; **Chebyshev I** – фильтр Чебышева 1-го рода; **Chebyshev II** – фильтр Чебышева 2-го рода; **Elliptic** – фильтр эллиптический; **Bessel** – фильтр Бесселя. **Filter type** – тип фильтра, выбирается из списка: **Lowpass** – нижних частот; **Highpass** – верхних частот; **Bandpass** – полосно-пропускающий; **Bandstop** – полосно-заграждающий. Далее для каждого метода проектирования и типа фильтра выдается свой список параметров. Так для фильтра Баттерворта типа нижних частот параметрами являются: **Filter order** – порядок фильтра; **Passband edge frequency (rads/sec)** – нижняя граничная частота (радиан в секунду). Для других методик проектирования и типов фильтров определяемые параметры очевидны.



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.



Enabled Subsystem – блок **Е**-подсистемы. Исходный шаблон блока содержит в своем составе блок **Enable** – блок управления; входной и выходной порты и линию связи между ними. После того как блок подсистемы скопирован из библиотеки в окно модели, он становится доступным для редактирования. Блок может содержать в своем составе другие блоки и подсистемы. Число входных и выходных портов определяется конфигурацией подсистемы и устанавливается пользователем. *Назначение:* **Е**-подсистема активизируется при наличии положительного сигнала на управляющем входе. Если входной сигнал векторный, то

подсистема активизируется, если хотя бы один элемент принимает положительное значение. Величина выходного сигнала в том случае, если система заблокирована, определяется настройками выходных портов подсистемы (блоки **Output**). Сама E-подсистема является неделимой подсистемой. Её свойства определяются параметрами блока **Enabled Subsystem** и совпадают со свойствами блока **Subsystem**. *Параметры блока:* **Show port labels** – показать метки портов; **Treat as atomic unit** – считать подсистему неделимой; **Read/Write Permissions** – разрешить чтение и запись, допустимы 3 опции: **ReadWrite** – чтение и запись; **Read Only** – только чтение; **NoReadOrWrite** – ни чтения ни записи. **Name of error callback function** – имя функции ответного вызова.

Блок **Enable** – управляющий вход. *Параметры блока:* **States when enabling** – состояние при запуске, задает состояние подсистемы при каждом запуске и выбирается из списка: **held** – использовать предыдущее активное состояние; **reset** – использовать начальное (исходное состояние). **Show output port** – показать выходной порт, при установленном флажке на пиктограмме блока **Enable** появляется дополнительный выходной порт, сигнал с которого может быть использован для управления блоками внутри подсистемы. Флажок **Enable zero crossing detection** – предписывает фиксировать прохождение сигнала через нулевой уровень.

Пользователь может автоматически создать блок **Subsystem**. Для этого необходимо выделить с помощью мыши нужный фрагмент модели и выполнить команду **Create Subsystem** из меню **Edit** в окне модели. Выделенный фрагмент будет помещен в подсистему, а входы и выходы будут снабжены соответствующими портами. В дальнейшем, если это необходимо, можно объявить этот блок неделимым, изменив параметры, или сделать условно управляемым, добавив управляющие входы. Отменить группировку блоков в подсистему можно командой **Undo**.



Repeating Sequence – источник периодического сигнала. *Назначение:* формирование заданного пользователем периодического сигнала. *Параметры блока:* **Time values** – вектор значений времени; **Output values** – вектор значений сигнала. Блок выполняет линейную интерполяцию выходного сигнала для моментов времени не совпадающих со значениями, заданными вектором **Time values**.

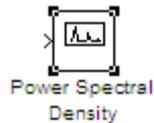


Multiport Switch – блок многовходового переключателя. *Назначение:* выполняет переключение входных сигналов на выход по сигналу управления, задающему номер активного входного порта. *Параметры блока:* **Number of inputs** – количество входов; флажок **Show**

additional parameters – показать дополнительные параметры, в нашем случае не используется. Блок **Multiport Switch** пропускает на выход сигнал с того входного порта, номер которого равен текущему значению управляющего сигнала. Если управляющий сигнал не является сигналом целого типа, то блок **Multiport Switch** производит округление значения в соответствии со способом, выбранным в графе дополнительного параметра **Round integer calculations toward**.

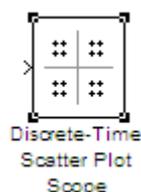


Real-Imag to Complex – блок вычисления комплексного числа по его действительной и мнимой частям. *Назначение:* вычисление комплексного значения по его проекциям на действительную и мнимую оси. *Параметры блока:* **Input** – входной сигнал, значение выбирается из списка: **Real** – действительная часть; **Image** – мнимая часть; **RealAndImage** – действительная и мнимая часть. **Image part** – мнимая часть, параметр доступен, если **Input** определен как **Real**. **Real part** – действительная часть, параметр доступен, если **Input** определен как **Image**. Входные сигналы могут быть скалярными, векторными или матричными. Параметры **Real part** и **Image part** при векторном или матричном входном сигнале должны задаваться как векторы или матрицы.



Power Spectral Density – блок анализатора спектральной плотности мощности из раздела **Simulink Extras** библиотеки **Simulink** [4]. *Назначение:* отображение спектральной плотности мощности временной реализации сигнала с использованием преобразования Фурье (**FFT**). *Параметры блока:* **Length of buffer** – размер буфера, по умолчанию **128** отсчетов сигнала; **Number of points for fft** – число отсчетов сигнала используемых при **FFT** преобразовании, по умолчанию **512** отсчетов сигнала; **Plot after how many plots** – построение графика после указанного числа точек спектра, по умолчанию **64** точки; **Sample time** – шаг дискретизации по времени, по умолчанию **0.1** сек.

В нашем случае блок **Power Spectral Density** позволяет оценить эффективность использования полосы пропускания исследуемого типа фазовой манипуляции.



Discrete-Time Scatter Plot Scope – блок отображения диаграммы рассеяния фазовых состояний сигнала из подраздела **Comm Sinks** раздела **Communication Blockset** библиотеки **Simulink** [5]. *Назначение:* отображение диаграммы рассеяния фазовых состояний за счет

влияния полосы пропускания и помех тракта передачи. *Параметры блока:* Флажок **Show Plotting Properties** – показать графические установки; **Samples per Symbol** – шаг периода символа; **Offset (samples)** – смещение шагов; **Points displayed** – число отсчетов сигнала, начиная с которого отображается диаграмма; **New points per display** – число отсчетов при обновлении отображения; флажки **Show Rendering Properties, Show Axes Properties, Show Figure Properties** – показать свойства отображения, осей и фигуры в нашем случае не используются.



Discrete-Time Signal Trajectory Scope – блок отображения диаграммы переходов фазовых состояний сигнала из подраздела **Comm Sinks** раздела **Communication Blockset** библиотеки **Simulink** [5]. *Назначение:* отображение диаграммы рассеяния фазовых состояний за счет влияния полосы пропускания и помех тракта передачи. *Параметры блока:* Флажок **Show Plotting Properties** – показать графические установки; **Samples per Symbol** – шаг периода символа; **Offset (samples)** – смещение шагов; **Points displayed** – число отсчетов сигнала, начиная с которого отображается диаграмма; **New points per display** – число отсчетов при обновлении отображения; флажки **Show Rendering Properties, Show Axes Properties, Show Figure Properties** – показать свойства отображения, осей и фигуры в нашем случае не используются.

В нашем случае диаграммы блоков **Discrete-Time Scatter Plot Scope** и **Discrete-Time Signal Trajectory Scope** позволяет оценить влияние метода модуляции, полосы пропускания и шумов канала передачи на фазовую диаграмму состояний принятого сигнала.

5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ

1. Собрать **Sim**-модель для исследования **MSK** модема с естественным принципом модуляции и демодуляции фазовых состояний несущей частоты, в соответствии с рисунком 1.1.

2. Выставить параметры блоков **Sim**-модели, согласованные с исходными параметрами блока источника случайного сигнала с равномерным распределением (**Uniform Random Number**), например: **Minimum = -1; Maximum = 1; Initial seed = 11; Sample time = 0.5**.

3. Пронаблюдать и зафиксировать основные осциллограммы, иллюстрирующие работу модема квадратурной **MSK** манипуляции.

4. Изменить параметр **Initial seed** блока источника случайного сигнала с равномерным распределением (**Uniform Random Number**) и пронаблюдать работу модема при другой входной последовательности.

5. Изменить параметр **Sample time** на (1 или 2) блока источника случайного сигнала с равномерным распределением (**Uniform Random**

Number), выставить согласованные параметры остальных блоков **Sim**-модели, пронаблюдать работу **MSK** модема и сделать выводы.

6. Модернизировать функциональную схему **MSK** модема в **OQPSK** модем, путем исключения преобразователя прямоугольных модулирующих импульсов в синусоидальные, пронаблюдать изменения спектральной плотности мощности, фазовых диаграмм и сделать выводы.

7. Преобразовать схему *восстановления исходной последовательности импульсов* по принятым квадратурным модулирующим импульсам, реализованную на основе двухпортового переключателя (**Multiport Switch**) и управляемого генератора пилообразного напряжения (**Repeating Sequence**), в схему на основе простого переключателя (**Switch**), управляемого опорным генератором прямоугольных импульсов (**Pulse Generator**) с периодом равным дибиту и скважностью 2.

6 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое квадратурная модуляция и перечислить основные ее преимущества?

2. Объясните работу **MSK модулятора** модема с естественным принципом модуляции и демодуляции фазовых состояний несущей частоты при помощи комплексной формы записи сигнала.

3. Объясните работу **MSK демодулятора** модема с естественным принципом модуляции и демодуляции фазовых состояний несущей частоты при помощи комплексной формы записи сигнала.

4. Для чего в **MSK** модуляторе используются квадратурные модулирующие импульсы $d_I \cdot |\sin(\pi \cdot t / (2 \cdot T))|$ и $d_Q \cdot |\cos(\pi \cdot t / (2 \cdot T))|$?

5. Объясните принцип работы формирователя квадратурных модулирующих импульсов **MSK** модулятора.

6. Объясните принцип работы схемы восстановления исходной последовательности импульсов по принятым квадратурным модулирующим импульсам.

7. Какую функцию в схеме выполняет блок **Enabled Subsystem** со встроенными блоками **Sign** и как можно модифицировать реализацию данной функции?

8. Какую функцию в схеме выполняют блоки **Analog Filter Design**?

9. Опишите изменения в спектре сигнала при расширении его длительности во временной области в два раза и изменении прямоугольной формы на синусоидальную форму.

10. Как влияет увеличение длительности бита в квадратурных каналах в два раза на скорость передачи информации?

11. В чем преимущества манипуляции **MSK** перед **OQPSK** манипуляцией?

12. Чем отличается модулятор **MSK** с фазовым кодером от модулятора без кодера?

13. Изобразите функциональную схему квадратурного фазового модулятора исследуемого **MSK** модема.

14. Изобразите функциональную схему квадратурного фазового демодулятора исследуемого **MSK** модема.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение, 2-е изд., исправл.: Пер. с англ. – М.: Изд. дом “Вильямс”, 2003.- 1104 с.

2. Гульятяев А.К. **MatLab 5.3**. Имитационное моделирование в среде **Windows**: Практическое пособие. – СПб.: КОРОНА принт, 2001.- 400 с.

3. Черных И.В. **Simulink**: среда создания инженерных приложений. / Под общ. ред. В.Г. Потемкина – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2003.- 496 с.

4. Дьяконов В.П. **MatLab 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6**. Основы применения. Сер. Библиотека профессионала. - М.: СОЛОН-Пресс, 2005.- 800 с.

5. Дьяконов В.П. **MatLab 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6** в математике и моделировании. Сер. Библиотека профессионала. - М.: СОЛОН-Пресс, 2005.- 576 с.