

Основы теории радиосистем передачи информации

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

*к выполнению лабораторных работ № 7 - 9
для студентов специальности 11.05.01
«Радиоэлектронные системы и комплексы»
очной формы обучения*

Воронеж 2022

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования

«Воронежский государственный технический университет»

Кафедра радиоэлектронных устройств и систем

Основы теории радиосистем передачи информации

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

*к выполнению лабораторных работ № 7 - 9
для студентов специальности 11.05.01
«Радиоэлектронные системы и комплексы»
очной формы обучения*

Воронеж 2022

УДК 721:53(073)
ББК 38.113я7-5

Составитель канд. техн. наук Д. В. Журавлёв

Основы теории радиосистем передачи информации: методические указания к выполнению лабораторных работ № 7 - 9 для студентов специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы» очной формы обучения / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост.: Д. В. Журавлёв. – Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2022.– 36 с.

В методических указаниях изучаются вопросы исследования аналоговых и цифровых модемов, канальных кодеков. Тематика лабораторных работ соответствует рабочей программе дисциплины «Основы теории радиосистем передачи информации».

Предназначены для студентов 5 курса специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы» очной формы обучения.

Методические указания подготовлены в электронном виде и содержатся в файле ОТПСПИ_УМД_ЛР7-9.pdf.

Ил. 49. Табл. 3. Библиогр.: 4 назв.

УДК 721:53(073)
ББК 38.113я7-5

Рецензент – А. В. Останков, д-р техн. наук, профессор
кафедры радиотехники ВГТУ

*Издается по решению редакционно-издательского совета
Воронежского государственного технического университета*

ВВЕДЕНИЕ

Данные методические указания к выполнению лабораторных работ составлены в соответствии с программой курса «Основы теории радиосистем передачи информации» для специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы».

Лабораторные работы посвящены изучению аналоговых и цифровых модемов различных типов, а также канальных кодеков. Моделирование осуществляется в программе Matlab в среде Simulink.

Каждая лабораторная работа описана в отдельном разделе, который содержит краткие теоретические сведения, описание хода работы.

Методические указания содержат авторские иллюстрации.

1. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7 АНАЛОГОВЫЙ МОДЕМ

1.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Цель работы заключается в выполнении моделирования модема (в программной среде Simulink Matlab) заданного типа при частоте сигнала F и частоте несущей F_c . Во всех моделях необходимо использовать блоки:

- Источник модулирующего сигнала - Sine Wave;
- Модулятор и демодулятор;
- Канал связи AWGN с гауссовским шумом;
- Наблюдатель Scope для просмотра сигналов;
- Анализатор спектра Spectrum Scope.

1.2. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

При передаче сигналов по линиям связи прямая передача не всегда возможна, так как физическая среда распространения не согласуется с сигналом. Поэтому для передачи используется более высокочастотное колебание - переносчик (несущая - carrier). Параметры переносчика меняются по закону первичного сигнала. Процесс изменения называется модуляцией.

В зависимости от того, какой параметр несущей модулируется, различают амплитудную (АМ), частотную (ЧМ) и фазовую (ФМ) модуляцию. Устройство, исполняющее этот процесс, называется модулятором.

При приеме первичный сигнал извлекается из принятого сигнала. Процесс извлечения называется демодуляцией. Устройство, исполняющее этот процесс, называется демодулятором.

Модулятор и демодулятор образуют комплекс, который называется модемом. Известны аналоговые и цифровые модемы.

1.3. ЗАДАНИЯ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ

Необходимо выполнить моделирование модема заданного типа при частоте сигнала F и частоте несущей F_c . Во всех моделях надо использовать блоки:

- Генератор синусоиды Sine Wave. Блок находится в Signal Processing Toolbox => Signal Processing Sources. Источник модулирующего сигнала.
 - Модулятор и демодулятор. Из Communications Blockset => Modulation.
 - Канал связи с гауссовским шумом AWGN channel. Блок находится в Communications Blockset => Channels.
 - Наблюдатель Scope. Блок находится в Simulink => Sinks. В нем 3 входа.
 - Анализатор спектра Spectrum Scope. Блок находится в Signal Processing Toolbox => Signal Processing Sinks.
 - Spectrum Scope для модулирующего сигнала.
 - Spectrum Scope для модулированного сигнала.
- Варианты заданий приведены в табл. 1.

Таблица 1

Варианты заданий

№	Модем	F	F_c	Девияция	Полоса	M	F_{sep}
0	DSB AM	10	100				
1	DSBSC AM	10	100				
2	SSB AM	10	100				
3	DSB AM	10	100				
4	M-FSK					2	2
5	SSB AM	10	100		Нижняя		
6	SSB AM	10	100		Верхняя		
7	M_PAM					4	
8	FM	10	100	30			
9	PM	10	100	$\pi/2$			

Анализаторы спектра используют быстрое преобразование Фурье с числом отсчетов, равным 2 в целой степени. Будем использовать прямоугольное окно BoxCar и 256 отсчетов. Для других блоков модели нужно задать время отсчета Simple time, равным $1/256$.

1.4. ХОД ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Сначала необходимо выполнить моделирование аналогового модема с двухполосной амплитудной модуляцией - DSB. $F=10$, $F_s=50$.

Создаем модель в среде Simulink. В ней модулирующий сигнал выбирается ручным переключателем Manual Switch из двух возможных (как показано на рис. 1).

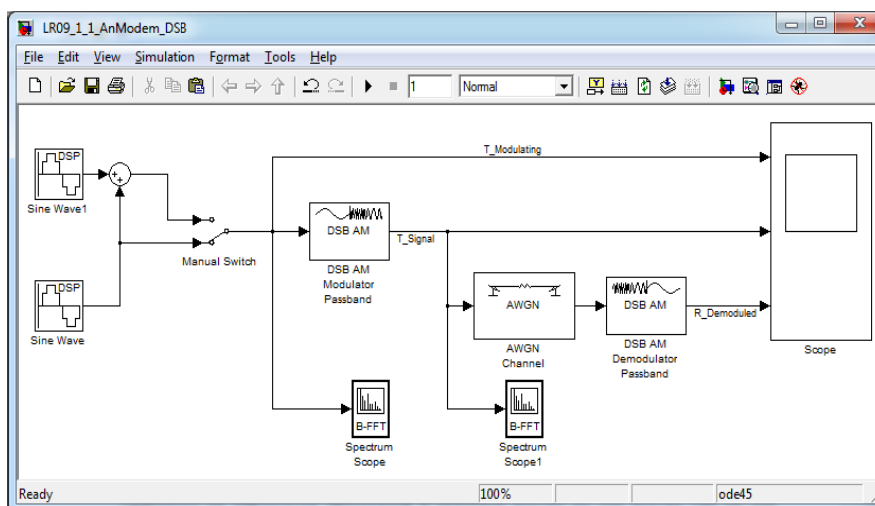


Рис. 1. Схема аналогового модема DSB

Моделирующий сигнал сумма синусоид. Анализаторы спектра показывают спектры модулирующего сигнала (слева) и модулированного сигнала (справа) (рис. 2).

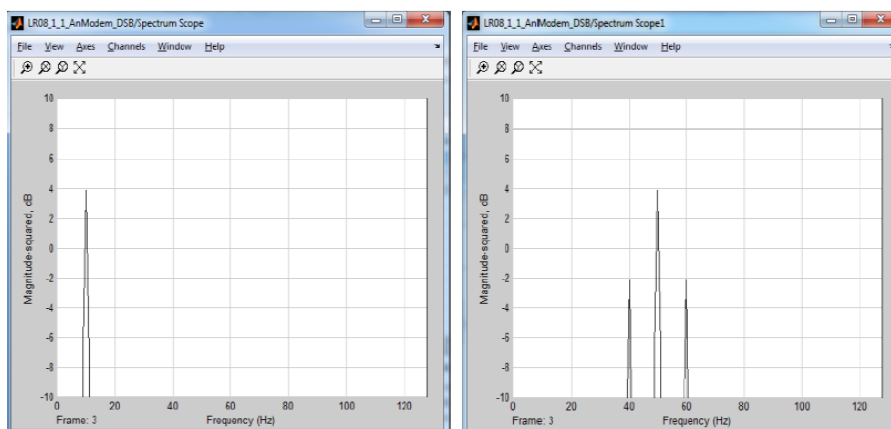


Рис. 2. Графики спектров моделирующих сигналов

Модулированный сигнал содержит несущее колебание, которое не несет информации и энергетически лишнее, а также две боковые полосы, связанные с одной и той же информацией (рис. 3).

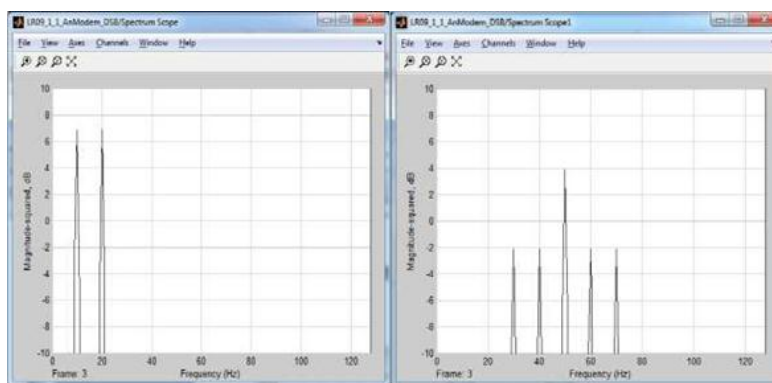


Рис. 3. Графики спектров моделированных сигналов

При моделировании с разными уровнями шума (рис. 4) получим:

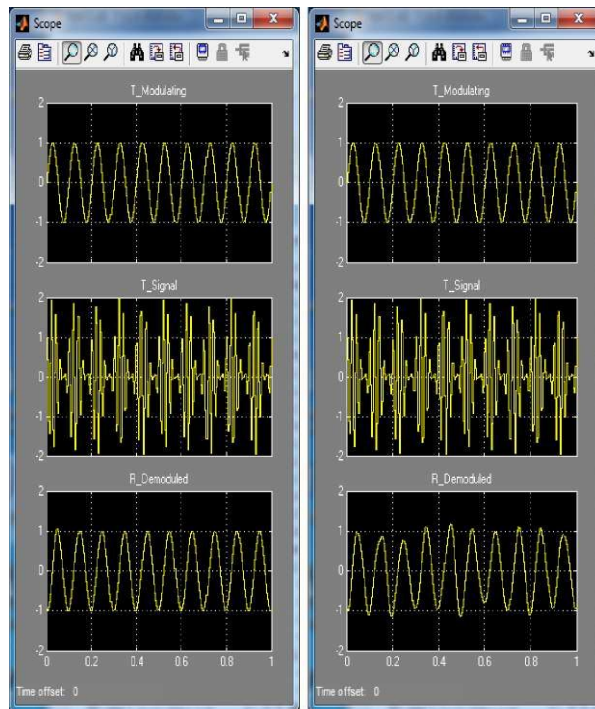


Рис. 4. Графики сигналов при различных уровнях шума

Слева $C/N=100$ дБ, шума практически нет. Сигнал демодулирован, но в нем может быть заметен остаток несущей. Причина неэффективный фильтр в демодуляторе. В этом случае можно выбрать в окне демодулятора более качественный фильтр;

Справа $C/N=10$ дБ. Шум заметен.

1.4.1. АНАЛОГОВЫЙ МОДЕМ DSBSC

Далее необходимо выполнить моделирование аналогового модема с двухполосной амплитудной модуляцией с подавленной несущей - DSBSC. $F=10$, $F_s=50$. Создаем модель в среде Simulink (рис. 5).

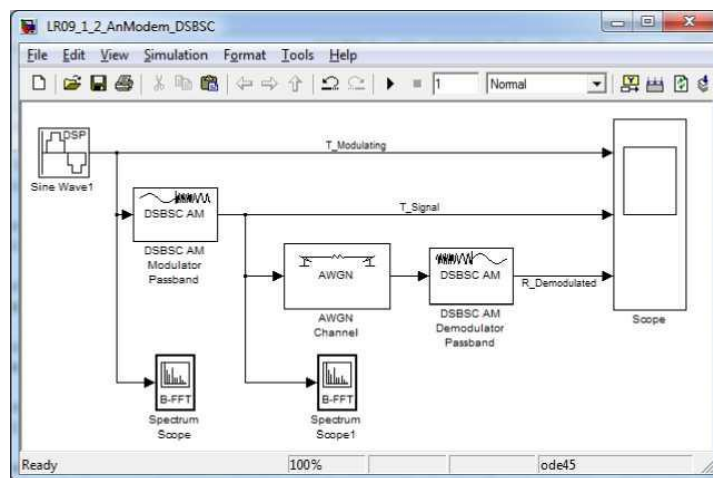


Рис. 5. Схема модема DSBSC

При моделировании анализаторы спектра показывают спектры модулирующего сигнала (слева) и модулированного сигнала (справа). Модулированный сигнал содержит две боковые полосы, связанные с одной и той же информацией. Несущее колебание подавлено. Энергетически это более выгодный способ АМ. При моделировании с разными уровнями шума получим:

- Слева $C/\text{Ш}=100$ дБ, шума практически нет. Сигнал демодулирован, но в нем может быть замечен остаток несущей. Причина неэффективный фильтр в демодуляторе. В этом случае можно выбрать в окне демодулятора более качественный фильтр.
- Справа $C/\text{Ш}=10$ дБ. Шум заметен меньше, чем при двухполосной АМ, так как энергия боковых полос выше (рис. 6).

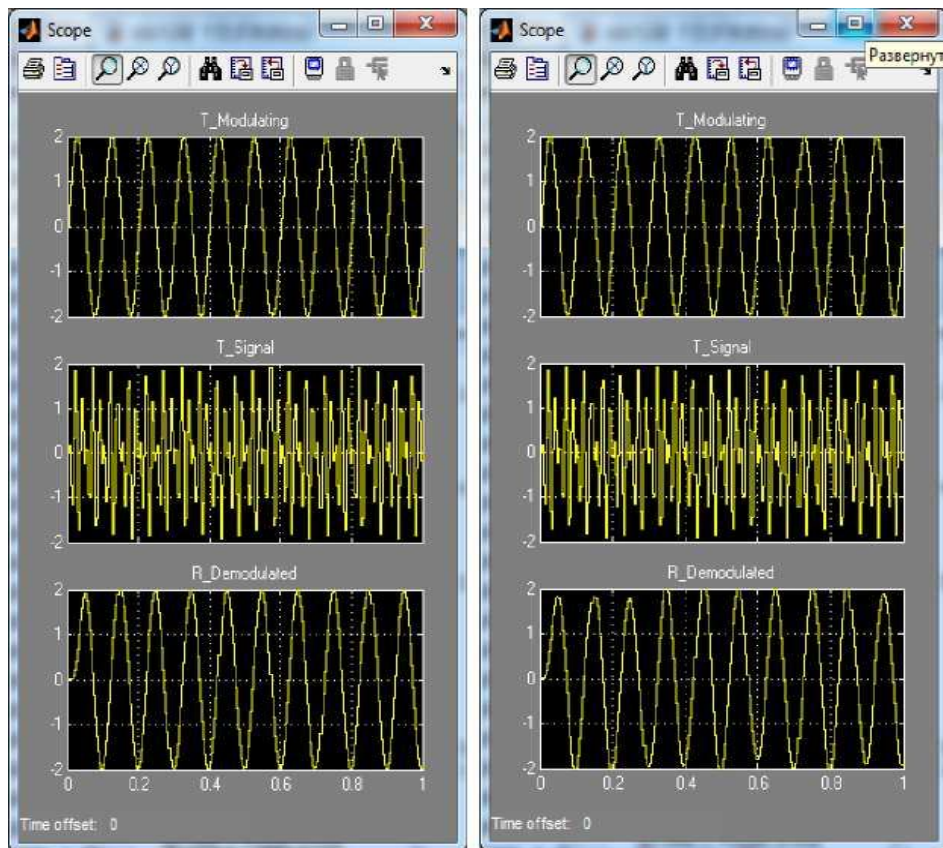


Рис. 6. Графики сигналов при различных уровнях шума

1.4.2. АНАЛОГОВЫЙ МОДЕМ SSB

Далее необходимо выполнить моделирование аналогового модема с однополосной амплитудной модуляцией с подавленной несущей - SSB (использована нижняя боковая). $F=10$, $F_s=50$. Создаем модель в среде Simulink, как показано на рис. 7.

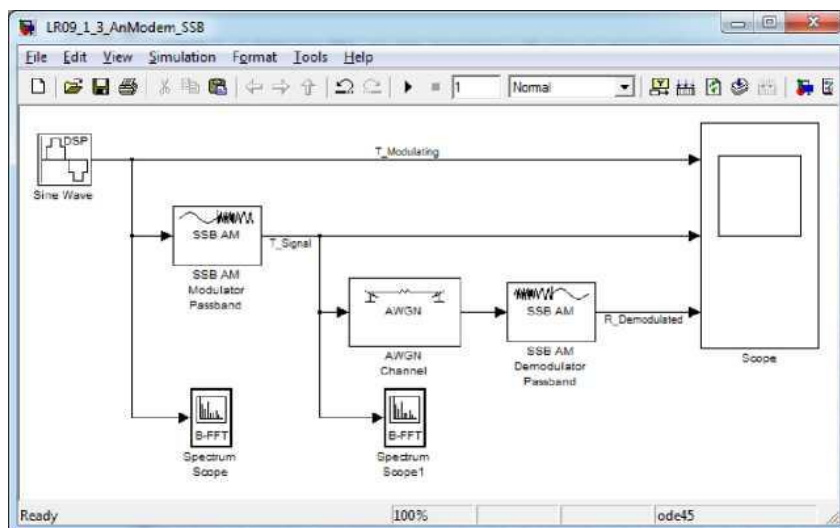


Рис. 7. Схема модема SSB

При моделировании анализаторы спектра рис. 8 показывают спектры модулирующего сигнала (слева) и модулированного сигнала (справа).

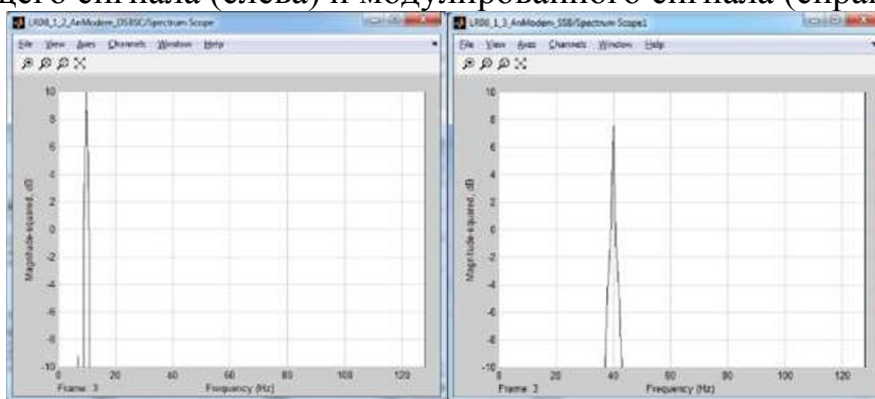


Рис. 8. Графики спектров сигналов

Модулированный сигнал содержит только одну боковую компоненту, связанную с информацией. Энергетически это самый выгодный способ АМ.

При моделировании с разными уровнями шума рис. 9 получим:

- Слева $C/\text{Ш}=100$ дБ, шума практически нет. Сигнал демодулирован, но в нем может быть замечен остаток несущей. Причина неэффективный фильтр в демодуляторе. В этом случае можно выбрать в окне демодулятора более качественный фильтр.

- Справа $C/\text{Ш}=10$ дБ. Шум замечен еще меньше, чем при двухполосной АМ с подавленной несущей, так как боковых полоса одна.

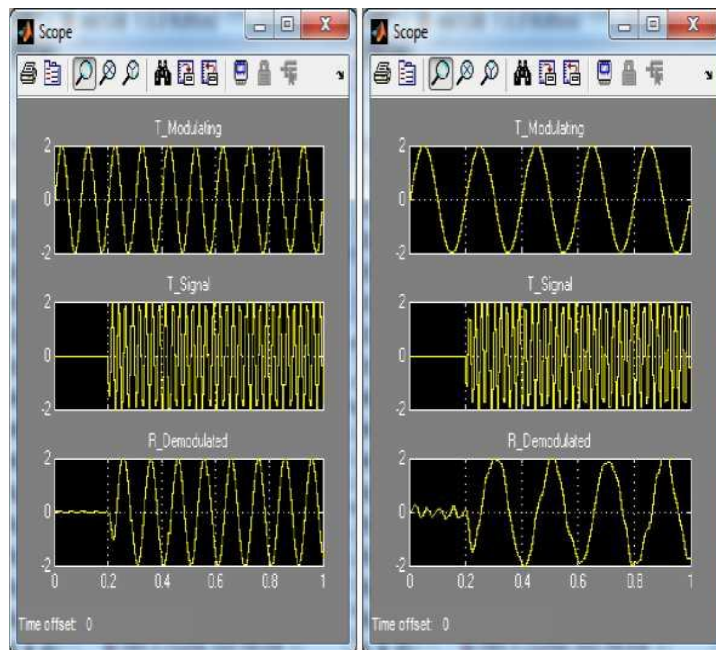


Рис. 9. Графики сигналов при различных уровнях шума

1.4.3. АНАЛОГОВЫЙ МОДЕМ FM

Далее необходимо выполнить моделирование аналогового модема с частотной модуляцией - FM. $F=10$, $F_s=50$, девиация частоты 30. Создаем модель в среде Simulink, как показано на рис. 10.

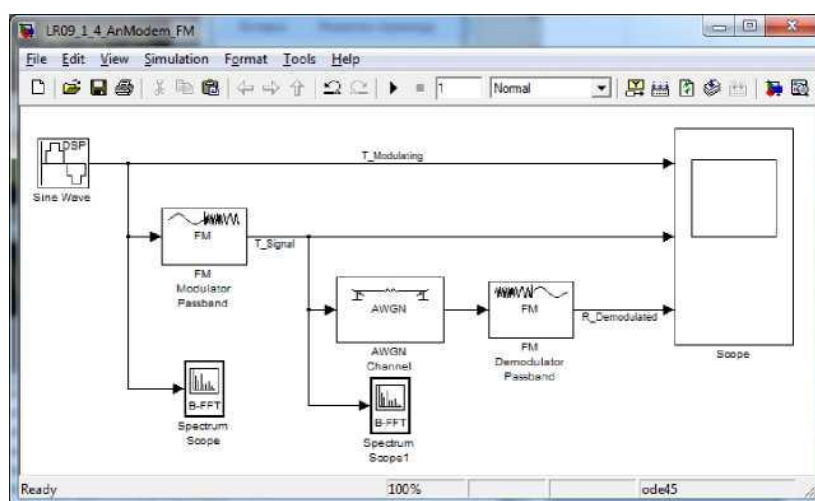


Рис. 10. Схема модема FM

При моделировании анализаторы спектра рис. 11 показывают спектры модулирующего сигнала (слева) и модулированного сигнала (справа).

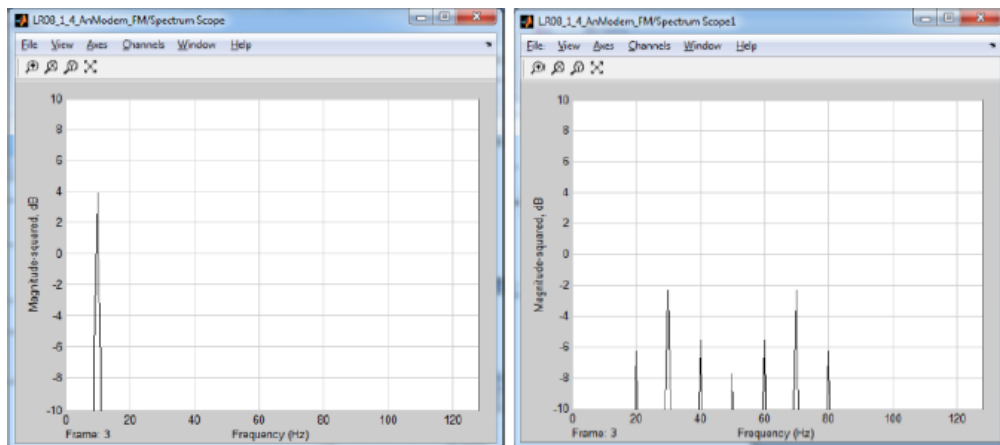


Рис. 11. Графики спектров

Модулированный сигнал содержит много боковых компонент, связанных с информацией. С точки зрения требуемой полосы частот радиоканала это невыгодный способ модуляции. При моделировании с разными уровнями шума получим рис. 12. Слева $C/\text{Ш}=100$ дБ, шума практически нет. Справа $C/\text{Ш}=10$ дБ. Шум малозаметен.

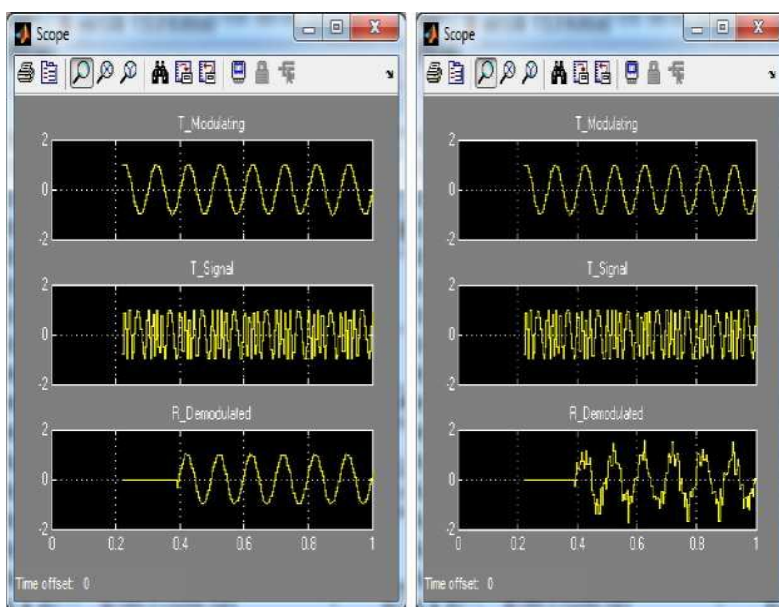


Рис. 12. Графики сигналов при различных уровнях шума

1.4.4. АНАЛОГОВЫЙ МОДЕМ РМ

Необходимо выполнить моделирование аналогового модема с фазовой модуляцией - РМ. $F=5$, $F_s=50$, девиация частоты 20. Создаем модель в среде Simulink (рис. 13).

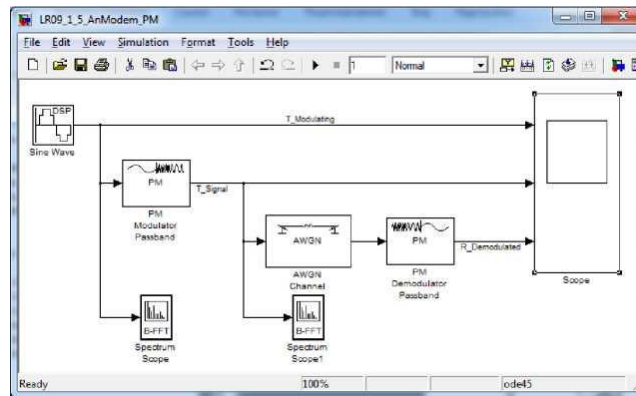


Рис. 13. Схема модема РМ

При моделировании анализаторы спектра рис. 14 показывают спектры модулирующего сигнала (слева) и модулированного сигнала (справа).

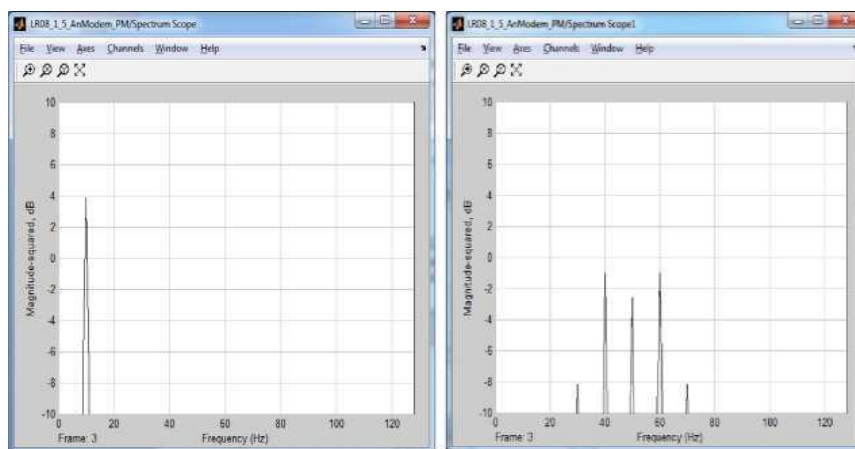


Рис. 14. Графики спектров сигналов

Модулированный сигнал содержит много боковых компонент, связанных с информацией. С точки зрения требуемой полосы частот радиоканала это невыгодный способ модуляции.

При моделировании с разными уровнями шума получим результат, показанный на рис. 15. На рисунке слева $C/\text{Ш}=100$ дБ, шума практически нет, сигнал демодулирован, но в нем может быть замечен остаток несущей. Причина неэффективный фильтр в демодуляторе. В этом случае можно выбрать в окне демодулятора более качественный фильтр. На рисунке справа $C/\text{Ш}=10$ дБ. Шум сильно замечен.

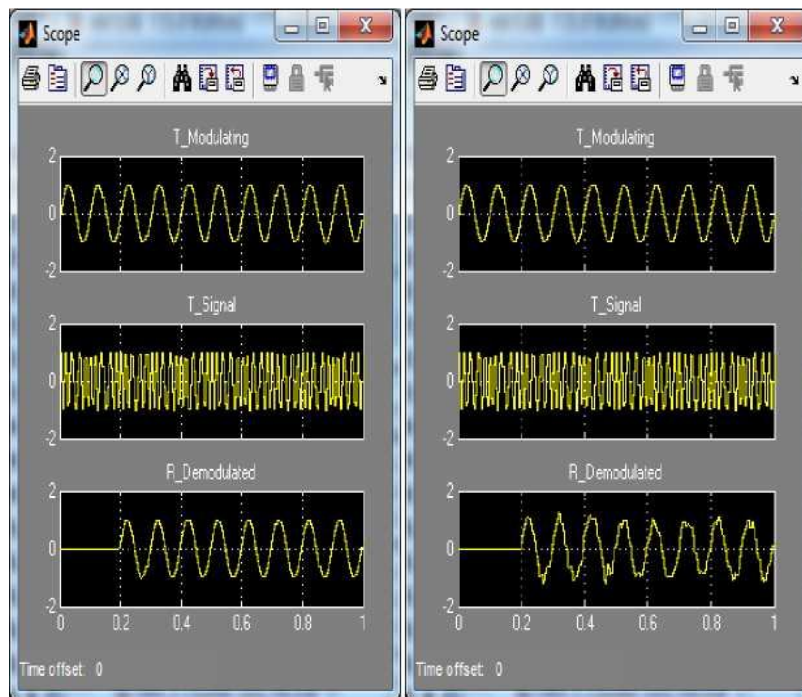


Рис. 15. Графики результатов моделирования

2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №8 ЦИФРОВЫЕ МОДЕМЫ

2.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ И КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Цель работы состоит в моделировании модема заданного типа при частоте сигнала F и частоте несущей F_c в программе Matlab.

Цифровые модемы с фазовой модуляцией (PSK = Phase Shift Keying) используют фазовую модуляцию с несколькими значениями фазы. На каждом такте передаваемый сигнал можно представить как вектор одной и той же амплитуды, но с разной фазой. Применяются разновидности PSK:

BPSK (Binary PSK) использует 2 фазы. Кодовая комбинация, передаваемая на одном такте - 1 бит со значениями 0 и 1. Им соответствует вектор с модулем 1 и фазами, отличающимися на π . Это означает самую низкую скорость передачи, но самую высокую помехозащищенность.

QPSK (Quadro PSK) использует 4 фазы. Кодовая комбинация, передаваемая на одном такте - 2 бита со значениями 0 или 1. Им соответствует вектор с модулем 1 и фазами, отличающимися на $\pi/2$. Скорость передачи в 2 раза выше, чем для BPSK, но помехозащищенность ниже.

M-PSK (Multiple PSK) использует M фаз. Кодовая комбинация, передаваемая на одном такте, имеет длину K , зависящую от M ($M=2^K$). Им соответствует вектор с модулем 1 и фазами, отличающимися на $2\pi/M$. При $M > 4$ скорость передачи выше, чем для BPSK или QPSK, но помехозащищенность ниже.

Цифровой модем Rectangular_QAM использует квадратурную амплитудную модуляцию (КАМ). Модулированный сигнал содержит

квадратурные компоненты: косинусная (или синфазная) и синусная (или противофазная). При их суммировании получается амплитудно-фазовая модуляция.

На каждом такте передаваемый сигнал можно представить как вектор определенными модулями и фазами. Концы векторов могут попадать в точки, которые образуют созвездие. Количество точек в созвездии $M=2K$, K - длина кодовой комбинации (КК). Длина кодовой комбинации K , передаваемой на одном такте, зависит от числа точек в созвездии $M=2K$. Например, при $K=4$ $M=16$. Скорость передачи в модеме КАМ выше, чем в модемах QPSK и BPSK, так как у них M выше. Помехозащищенность зависит от расстояния между точками в созвездии. Например, при одном и том же высоком M , КАМ лучше, чем M-PSK, так как точки в созвездии более разнесены.

Наиболее распространен модем Rectangular_QAM, в котором созвездие - это набор точек на прямоугольной решетке.

2.2. ЗАДАНИЕ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ

Выполнить моделирование модема заданного типа при частоте сигнала F и частоте несущей F_c .

Таблица 2

Варианты заданий

№	Модем	F	F_c	M
0	BPSK	10	60	
1	QPSK	10	100	
2	BPSK	10	60	
3	QPSK	10	100	
4	MPSK	10	60	2
5	MFSK	10	100	2
6	MPSK	10	60	2
7	MFSK	10	100	4
8	QAM	10	60	4
9	QAM	10	100	16

Во всех моделях необходимо использовать блоки:

- Источник данных, генератор случайных целых чисел - Random-Integer Generator. Блок находится в Communications Blockset => Comm Sources => Random Data Sources. Блок вырабатывает случайные числа в интервале $0 \dots M-1$.
- Модуляторы. Блоки находятся в Communications Blockset => Modulation => Digital Baseband Modulation. В окне его параметров задаем фазовое смещение (Phase Offset), равным 0, чтобы кодовых комбинаций (КК) размещались на оси X на карте созвездий.
- Канал связи с добавлением гауссовского шума AWGN Channel. Блок находится в Communications Blockset => Channels. В окне его параметров выбирается отношение сигнал/шум (С/Ш).

- Демодуляторы. Блоки находятся в Communications Blockset => Modulation => Digital Baseband Modulation. В окне его параметров задаем то же, что в модуляторе.
- Карта рассеяния Discrete-Time Scatter Plot. Блок находится в Communications Blockset => Comm Sinks. Блок используется для просмотра карты созвездий кодовых комбинаций сигналов. В окне надо задать достаточно большое число отображаемых точек (Point Displayed).
- Наблюдатель Scope. Блок находится в Simulink => Sinks. В нем 3 входа. Необходимо задать имена входов блока (T_Message - переданное сообщение, R_Message - принятое сообщение, Error - ошибка).
- Блоки преобразования комплексных чисел в формат амплитуда-фаза Complex to Magnitude-Angle. Блок находится в Simulink => Math Operations. Вещественные сигналы с выходов (амплитуда $|u|$) этих блоков надо передать на входы наблюдателя Scope.
- Сумматор Sum. Блок находится в Simulink => Math Operations. Блок ставим в режим вычитания, чтобы определить сигнал ошибки Error, разницу передаваемого и принятого сообщений.

2.3. ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

2.3.1. ЦИФРОВОЙ МОДЕМ BPSK

Необходимо выполнить моделирование цифрового модема с 2-кратной фазовой модуляцией - BPSK. Создаем модель в среде Simulink (рис. 16).

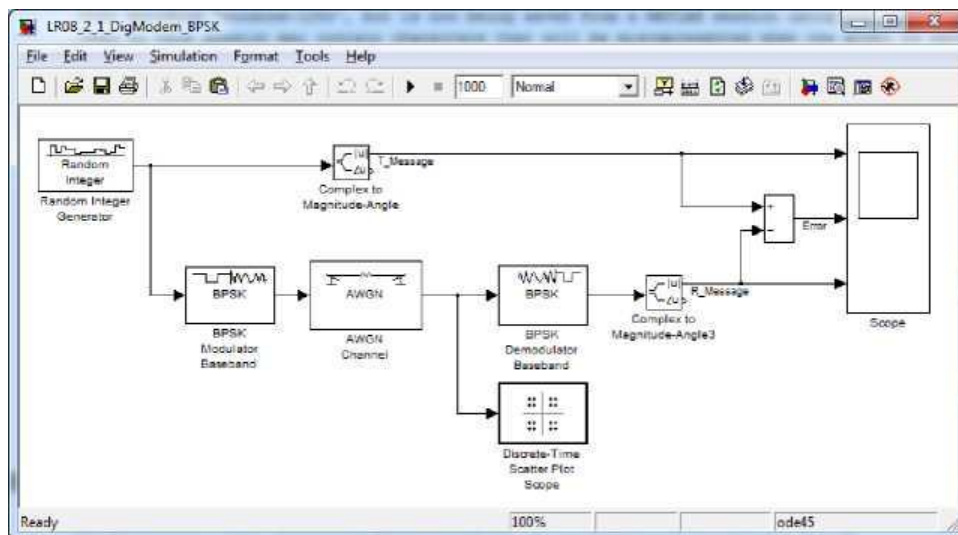


Рис. 16. Схема модема BPSK

При моделировании с разными уровнями шума получим следующее.

Для отношения $C/\Pi=100$ дБ, то есть шума практически нет (рис. 17). На карте рассеяния сигнала, возникающих помех не заметно. Соответственно передаваемое и принятое сообщения совпадают.

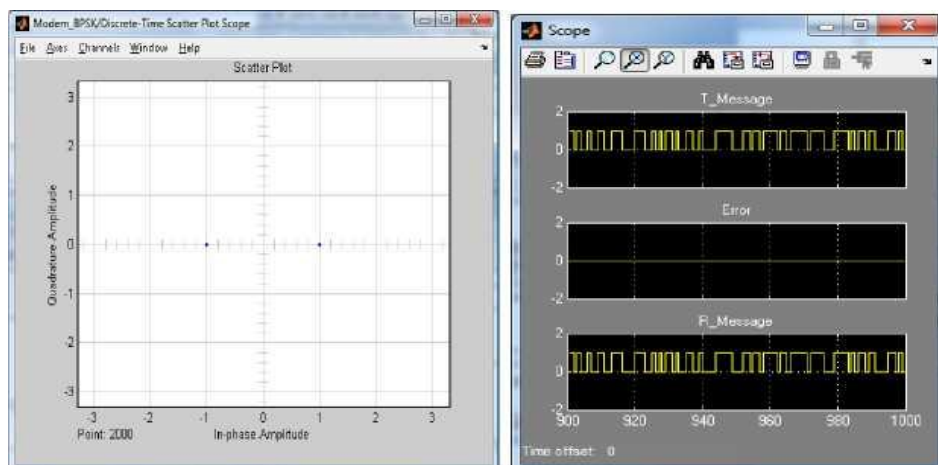


Рис. 17. График сигналов при отношении $C/\text{Ш}=100$ дБ

Для отношения $C/\text{Ш}=10$ дБ (шум есть). На карте рассеяния сигнала будут заметны помехи. Однако КК не перекрываются. Демодулятор формирует правильное сообщение. Сигнал ошибки равен 0 (Рис.18).

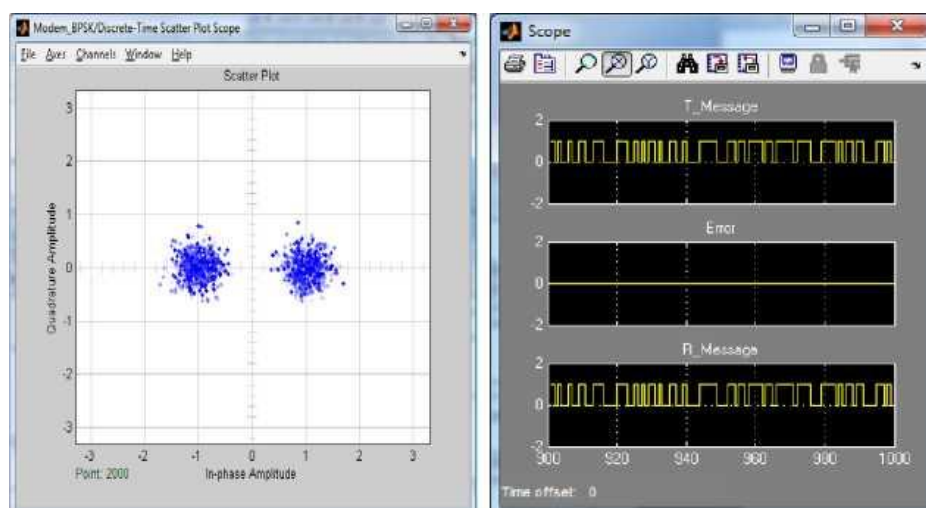


Рис. 18. График сигналов при отношении $C/\text{Ш}=10$ дБ

На рис. 19 показан случай для отношения $C/\text{Ш}=0$ дБ (интенсивный шум). На карте рассеяния сигнала помехи велики, КК не перекрываются. Демодулятор формирует сообщение с ошибками. Сигнал ошибки не равен 0.

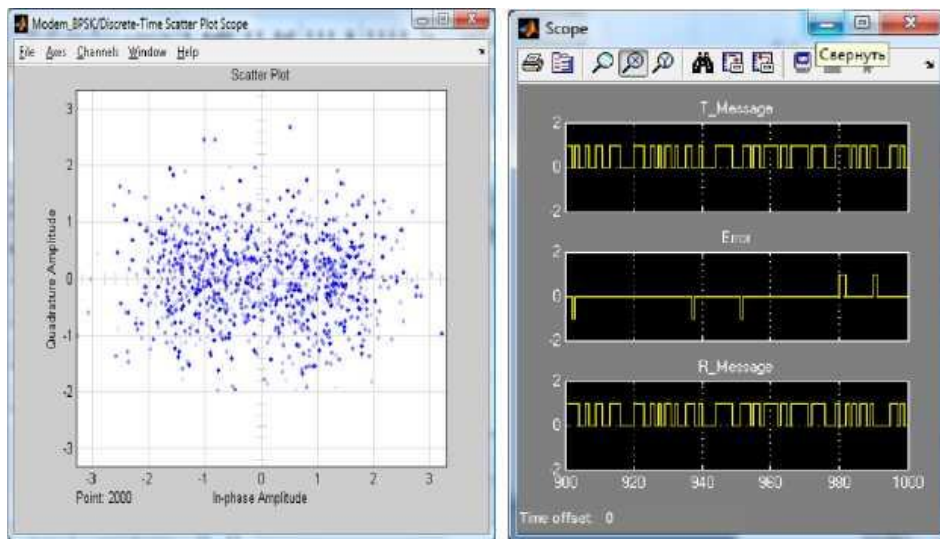


Рис. 19. График сигналов при отношении С/Ш=0 дБ

2.3.2. ЦИФРОВОЙ МОДЕМ QPSK

Необходимо выполнить моделирование цифрового модема QPSK. Для этого создаем модель в среде Simulink (Рис. 20).

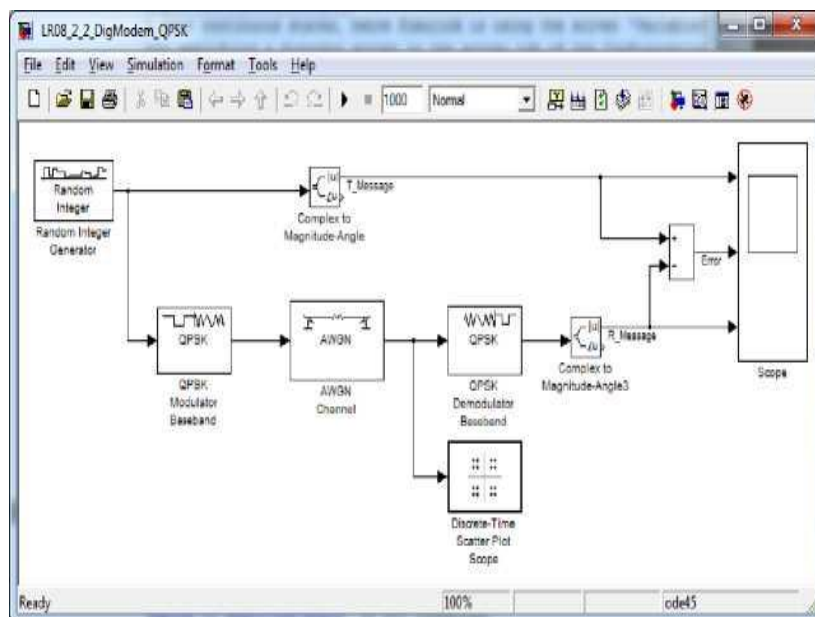


Рис. 20. Схема модема QPSK

При моделировании с разными уровнями шума получим следующее.

При $C/\text{Ш}=100$ дБ (шума практически нет). На карте рассеяния сигнала помех незаметно. Передаваемое и принятое сообщения совпадают (Рис. 21).

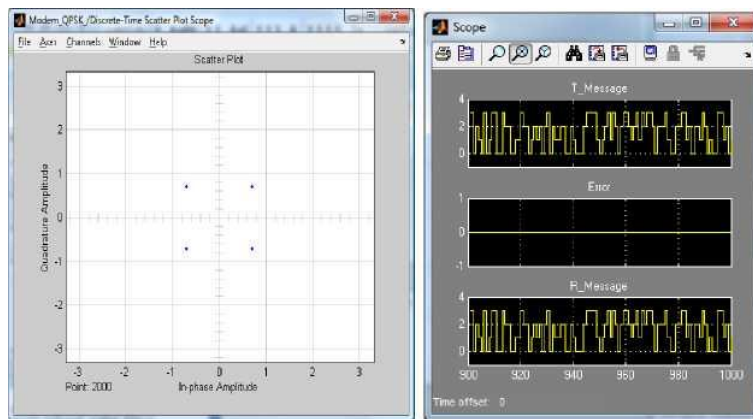


Рис. 21. График сигналов при отношении $C/\text{Ш}$ =100 дБ

При $C/\text{Ш}$ =10 дБ (шум есть). На карте рассеяния сигнала помехи заметны. Однако КК не перекрываются. Демодулятор формирует правильное сообщение. Сигнал ошибки равен 0 (Рис. 22).

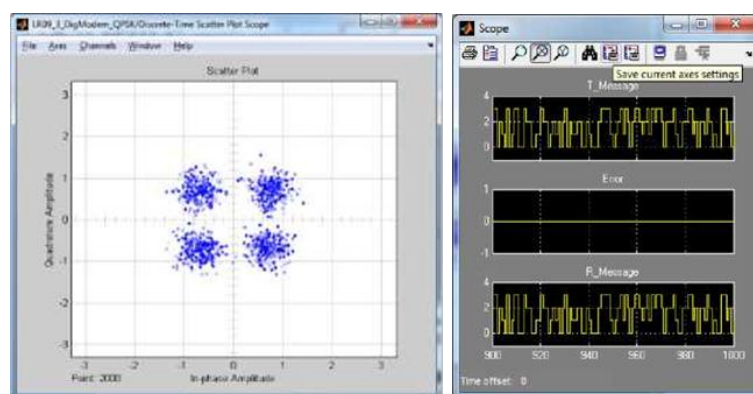


Рис. 22. График сигналов при отношении $C/\text{Ш}$ =10 дБ

При $C/\text{Ш}$ =0 дБ (интенсивный шум). На карте рассеяния сигнала помехи велики, КК не перекрываются. Демодулятор формирует сообщение с ошибками. Сигнал ошибки не равен 0 (Рис. 23).

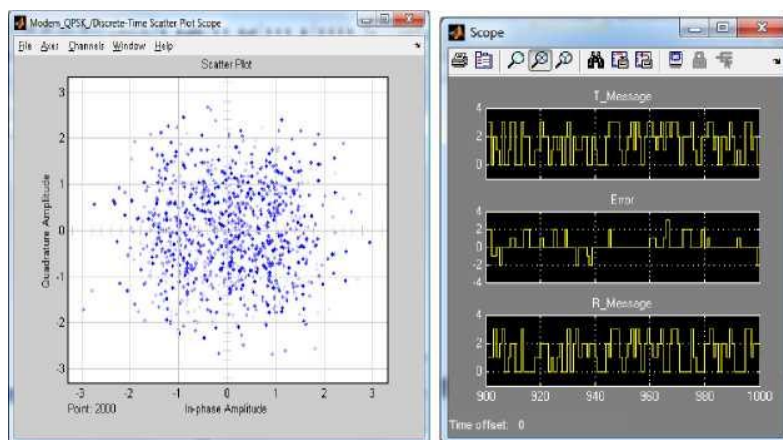


Рис. 23. График сигналов при отношении $C/\text{Ш}$ =0 дБ

2.3.3. ЦИФРОВОЙ МОДЕМ M-PSK

Выполнить моделирование цифрового модема M-PSK с $M=8$. Создаем модель в среде Simulink как показано на рис. 24.

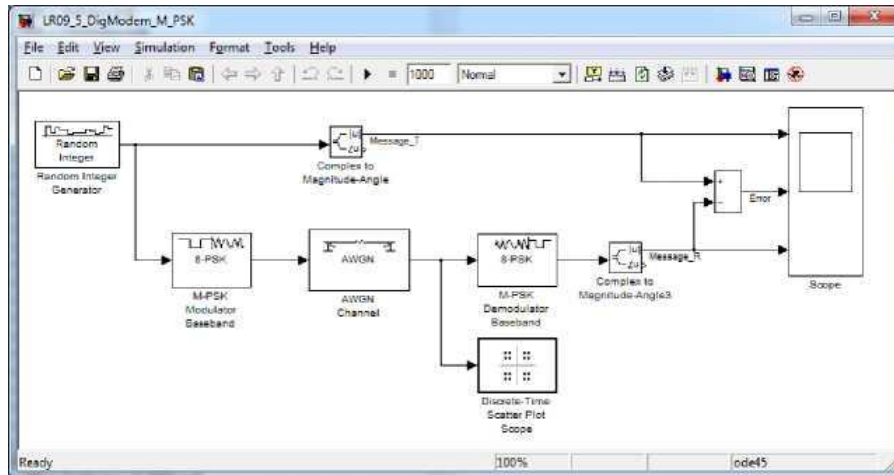


Рис. 24. Схема модема M-PSK

После моделирования при $C/\text{Ш}=100$ дБ получим, что шума практически нет. На карте рассеяния сигнала помех не заметно. Передаваемое и принятое сообщения совпадают (рис. 25).

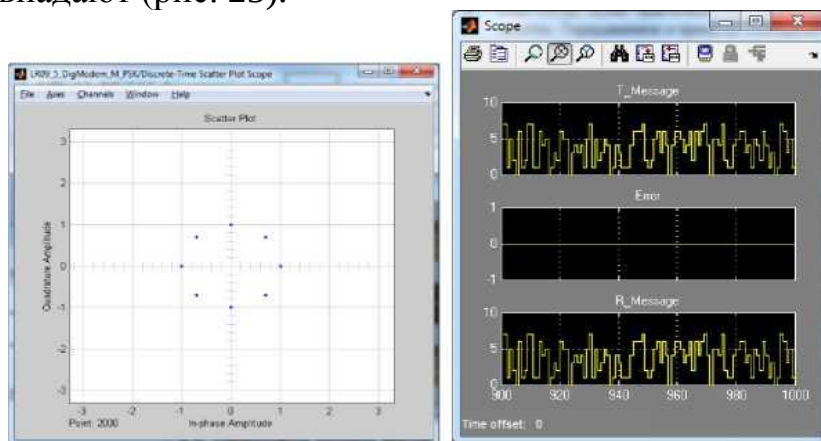


Рис. 25. График сигналов при отношении $C/\text{Ш}=100$ дБ

После моделирования при $C/\text{Ш}=10$ дБ получим интенсивный шум. На карте рассеяния сигнала помехи велики, КК не перекрываются. Демодулятор формирует сообщение с ошибками. Сигнал ошибки не равен 0 (рис. 26).

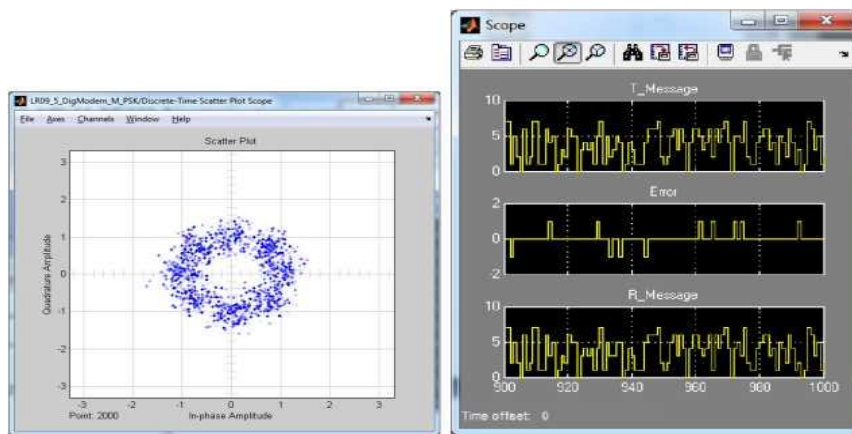


Рис. 26. График сигналов при отношении С/Ш=10 дБ

2.3.4 ЦИФРОВОЙ МОДЕМ M-FSK

Далее необходимо выполнить моделирование цифрового модема с множественной частотной модуляцией - M-FSK с $M=8$. Частотный разнос равен 6. Создаем модель в среде Simulink как показано на рис. 27.

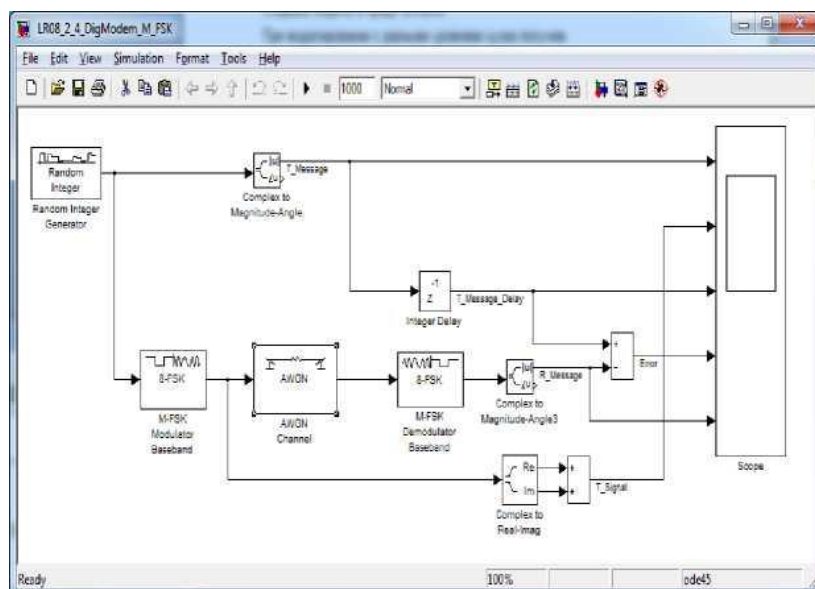


Рис. 27. Схема модема M-FSK

После моделирования с разными уровнями шума получим следующие результаты.

При $C/Ш=100$ дБ – случай когда шума практически нет. На карте рассеяния сигнала помех не заметно. Передаваемое и принятое сообщения совпадают (Рис. 28).

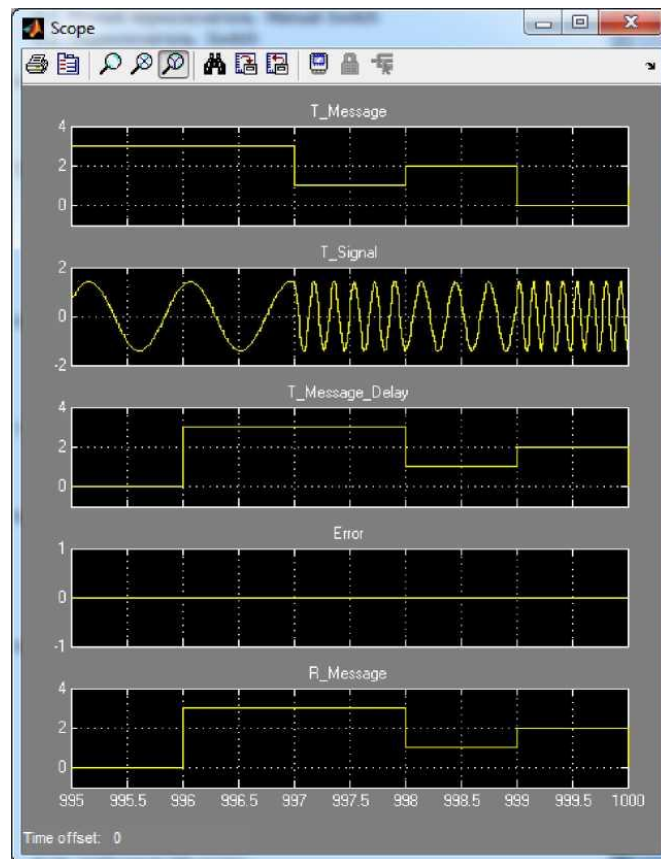


Рис. 28. Графики результатов моделирования без шума

При $C/\text{Ш}=0$ дБ – случай когда присутствует интенсивный шум. Демодулятор формирует сообщение с ошибками. Сигнал ошибки не равен 0 (Рис. 29).

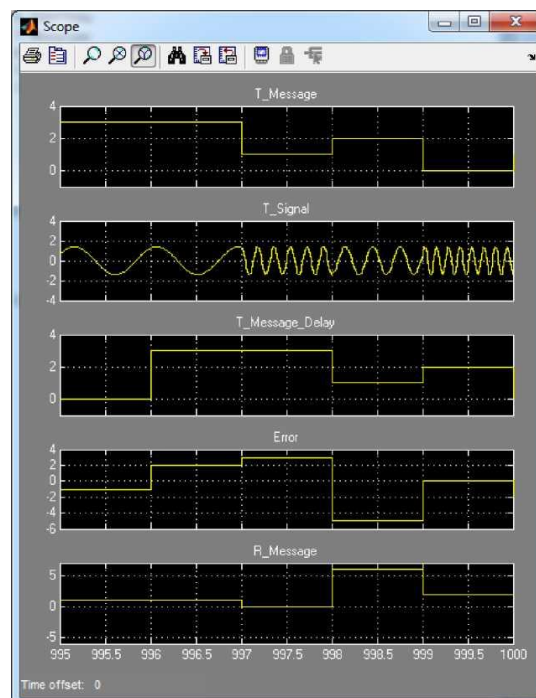


Рис. 29. График сигналов при отношении $C/\text{Ш}=0$ дБ

2.3.5. ЦИФРОВОЙ МОДЕМ М-РАМ

Далее необходимо выполнить моделирование цифрового модема с множественной амплитудной модуляцией - М-РАМ с $M=8$. Создаем модель в среде Simulink, как показано на рис. 30.

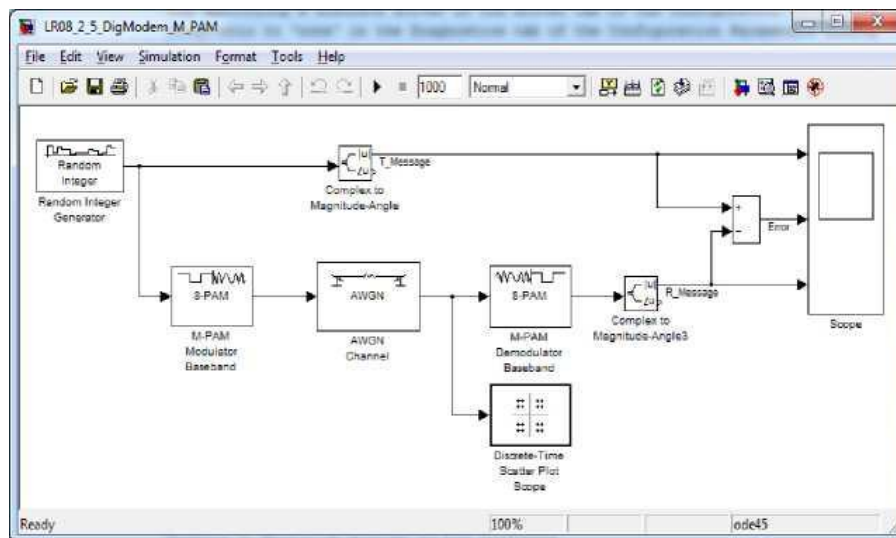


Рис. 30. Схема модема М-РАМ

После моделирования с разными уровнями шума получим следующие результаты. При С/Ш=100 дБ – случай когда шума практически нет. На карте рассеяния сигнала помех не заметно. Передаваемое и принятое сообщения совпадают (рис. 31).

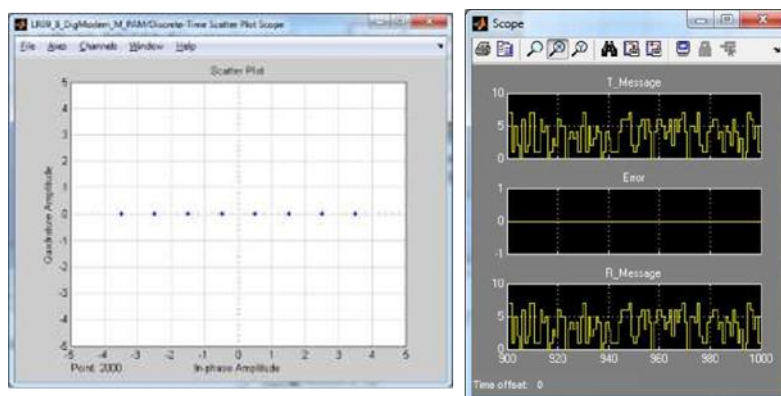


Рис. 31. Графики результатов моделирования без шума

При С/Ш=20 дБ – случай когда шум есть. На карте рассеяния сигнала помехи заметны. Однако КК не перекрываются. Демодулятор формирует правильное сообщение. Сигнал ошибки равен 0 (рис. 32).

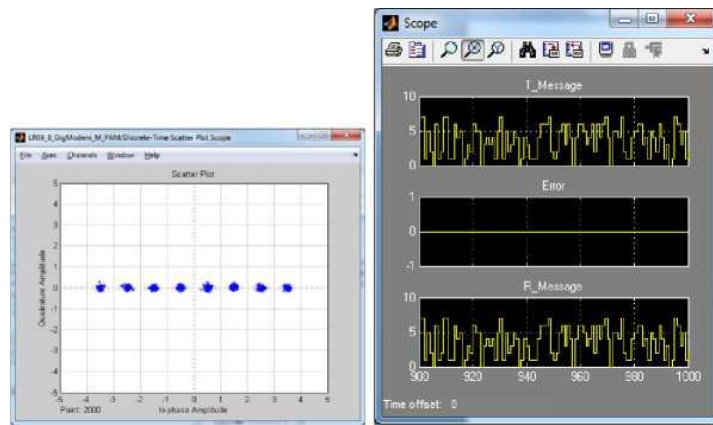


Рис. 32. Графики результатов моделирования при умеренном шуме

При $C/\text{Ш}=10$ дБ – когда присутствует интенсивный шум. На карте рассеяния сигнала помехи велики, КК не перекрываются. Демодулятор формирует сообщение с ошибками. Сигнал ошибки не равен 0 (рис. 33).

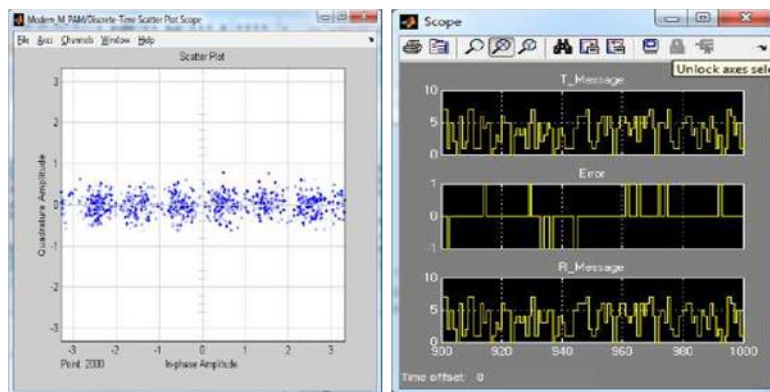


Рис. 33. Графики результатов моделирования

2.3.6 ЦИФРОВОЙ RECT_QAM МОДЕМ

Далее необходимо выполнить моделирование цифрового КАМ модема на прямоугольной решетке - RECT_QAM с $M=16$. Схема модели в среде Simulink показана на рис. 34.

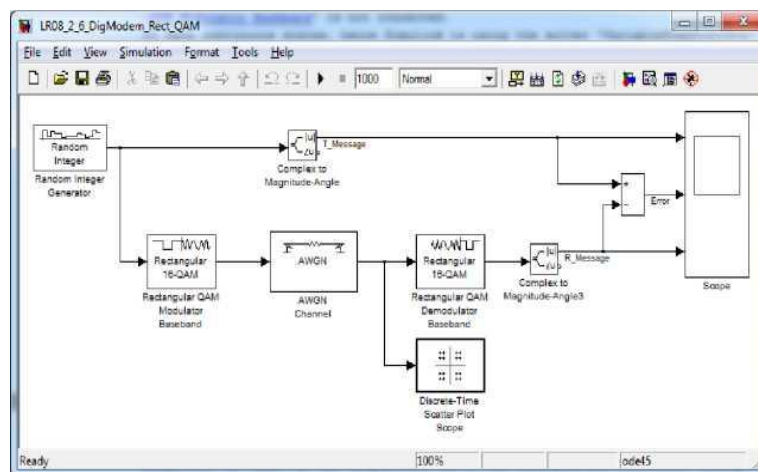


Рис. 34. Схема Rect QAM модема

После моделирования с различными параметрами получим следующие результаты. При $C/\text{Ш}=100$ дБ – случай когда шума практически нет. На карте рассеяния сигнала помех не заметно. Передаваемое и принятое сообщения совпадают (рис. 35).

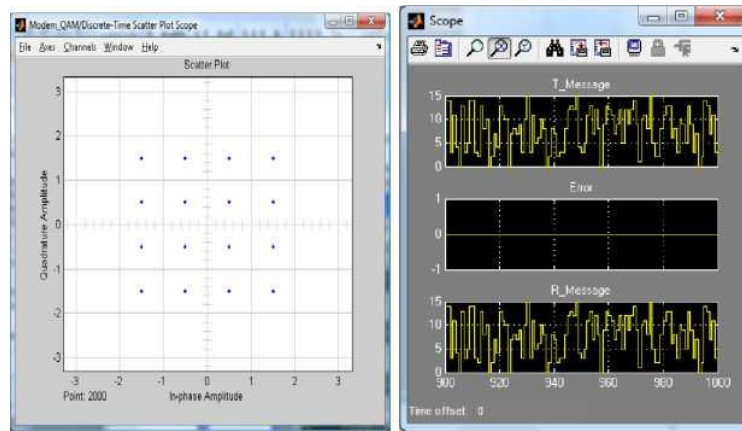


Рис. 35. Графики результатов моделирования без шума

При $C/\text{Ш}=20$ дБ – случай когда шум есть. На карте рассеяния сигнала помехи заметны. Однако КК не перекрываются. Демодулятор формирует правильное сообщение. Сигнал ошибки равен 0 (рис. 36).

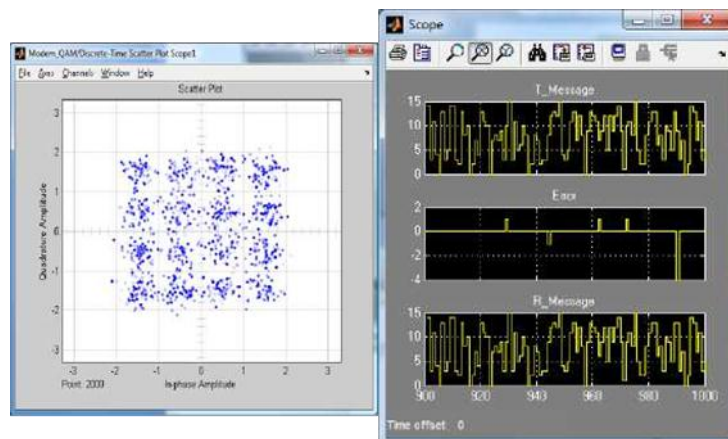


Рис. 36. Графики результатов моделирования с шумом

3. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №9 КАНАЛЬНЫЕ КОДЕКИ

3.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ И КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Цель работы заключается в приобретении навыков моделирования кодека в программе Matlab.

Принципы построения кода. Из информационного сообщения, содержащего слова кода U , по определенным правилам вырабатывается выходное сообщение, включающее кодовые слова V . В простых кодах используются все кодовые слова (комбинации), количество которых равно

$N=q^n$ (q - основание кода, а n - длина кода). Кодовые слова V отличаются друг от друга одним символом, поэтому даже один ошибочно принятый символ приводит к замене одного кодового слова другим и, следовательно, к неправильному приему сообщения в целом.

Помехоустойчивыми называются коды, позволяющие обнаруживать и (или) исправлять ошибки в кодовых словах V , которые возникают при передаче по каналам связи. Эти коды строятся таким образом, что для передачи сообщения используется лишь часть кодовых слов, которые отличаются друг от друга более чем в одном символе. Эти кодовые слова называются разрешенными. Остальные кодовые слова относятся к числу запрещенных и могут появиться из-за наложения помех в канале связи.

Существуют два способа помехоустойчивого кодирования:

- С обнаружением ошибок - приемник обнаруживает ошибку и по каналу обратной связи направляет запрос на повторную передачу данных. Метод применяется для каналов с малой вероятностью ошибок;
- С исправлением ошибок - приемник обнаруживает и исправляет ошибку. Метод применяется для каналов с высокой вероятностью ошибок. Использование даже простейших кодов с исправлением ошибок позволяет уменьшить вероятность ошибок в тысячи раз.

В помехоустойчивых (или канальных) кодах в сообщение U с целью повышения помехозащищенности вносится избыточность, добавляются проверочные символы. Основные параметры кодов:

- Длина k информационного слова U ;
- Длина $r = n - k$ управляющей последовательности P ;
- Длина $n = k + r$ кодового слова V ;
- Кодовое расстояние Хэмминга D - число позиций, в которых два разрешенных кодовых слова отличаются друг от друга;
- Кодовое расстояние $D_{\min}$ - это наименьшее D между различными парами кодовых слов. Если $D_{\min}=1$, то все слова разрешенные;
- Кратность обнаруживаемых ошибок T_o ;
- Кратность исправляемых ошибок T_i ;

Требуемое кодовое расстояние D определяется способом обработки ошибок: $D > T_o + 1$, если ошибки только обнаруживаются, $D > T_o + T_i + 1$, если часть ошибок исправляется, а часть только обнаруживается (при $T_o > T_i$).

Различают следующие классы помехоустойчивых кодов. Коды с контролем четности. В них в кодовом слове V контролируется четность или нечетность количества 1.

Линейные блочные коды. В них кодовое слово V включает две части - информационную U и управляющую P ($V = P, U$).

Циклические блочные коды. В них кодовое слово получается умножением U на генерирующий множитель G по правилам модульной арифметики. Реализация кодера с циклическими кодами проще.

Сверточные коды. В них слово U разбивается на части (кортежи U_1). Кодер имеет память для хранения U из нескольких кортежей. Кортежи записываются в эту память путем сдвига. Кодер и декодер имеют одинаковый набор состояний S , между которыми определены переходы по кортежу U_1 . Выходной код V включает номер состояния кодера S и кортеж U_1 . В декодере дублируется работа кодера, повторяется состояние S кодера, из которого извлекается слово U . Чтобы кодек работал, необходима синхронизация кодера и декодера - их состояния должны быть одинаковыми. Декодирование осуществляется по алгоритму Витерби, который ускоряет синхронизацию декодера с кодером.

3.2. ЗАДАНИЕ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ

Необходимо выполнить моделирование кодека при длине сообщения K , длине кодового слова N , R с кратностями ошибок T . Варианты заданий представлены в табл. 3.

Таблица 3

Варианты заданий

№	Кодек	K	N	Кратность ошибок T
0	Хэмминга	4	7	0, 1, 3
1	ВСН	4	7	0, 1, 3
2	Рида-Соломона	4	7	0, 1, 3
3	Сверточный	2	3	0,1,2
4	Хэмминга	11	15	0,1,6
5	ВСН	11	15	0,1,6
6	Рида-Соломона	11	15	0,1,6
7	Сверточный	2	3	0,1,3
8	Хэмминга	26	31	0,1,5
9	ВСН	26	31	0,1,8

Источник данных, генератор случайных двоичных чисел - Bernoulli Binary-Integer, вырабатывающий случайные биты. Блок находится в Communications Blockset => Comm Sources => RandomData Sources. Выход генератора нужно сделать в виде фрейма из $K=11$ отсчетов. В окне параметров блока зададим и вероятность нулей, равную 0,9.

Кодер. Блок находится в Communications Blockset => Error Detection and Correction => Blocks по сообщению K формирует передаваемый код V . В окне параметров блока задаем $N=15$ и число добавляемых символов $N-k=4$ как параметр функции генерации порождающей функции.

Умножитель Gain. Блок находится в Simulink => Math Operations. Он умножает выход кодера на вектор ошибки E из 0 и 1, имитирующий ошибки в канале связи (ошибка может получиться при компоненте E , равном 0). Вектор E должен содержать N компонент, которые вычислим функцией `rot90(randerr(N,1,N -ER))`. Получим вектор-строку из N равновероятных нулей и единиц, из которых $(N -ER)$ равны 1 (рис. 37).

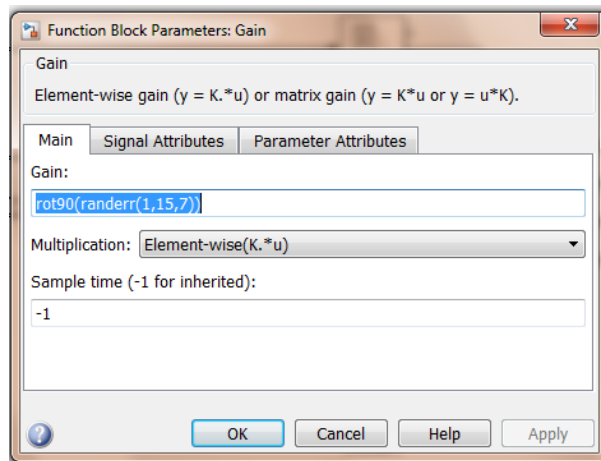


Рис. 37. Окно параметров усилителя

Декодер. Блок находится в Communications Blockset => Error Detection and Correction => Block. Для него нужно задать параметры, аналогичные кодеру.

Блок Unbuffer. Блок находится в Signal Processing Blockset => Signal management => Buffers. Они преобразуют фреймы в линейные последовательности, направляемые к виртуальному наблюдателю Scope.

Наблюдатель Scope. Блок находится в Simulink => Sinks. Он позволяет в общем масштабе времени наблюдать сигналы от блоков Buffer. Чтобы в графиках наблюдателя были заголовки, сделаем входам имена. Для этого двойным щелчком по линии входа вызовем окно ввода имени, в которое занесем имя. Зададим имена: для передаваемого сообщения - `T_Message`, для передаваемого кода `T_Code`, для принятого кода - `R_Code`, для декодированного сообщения `R_Message`.

3.3. ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

3.3.1. КОДЕК ХЭММИНГА

Необходимо выполнить моделирование кодека Хэмминга без ошибок $T_0=0$, и с ошибками с кратностью $T_1=1$, $T_2=2$. Для этого создаем модель в среде Simulink (рис. 38).

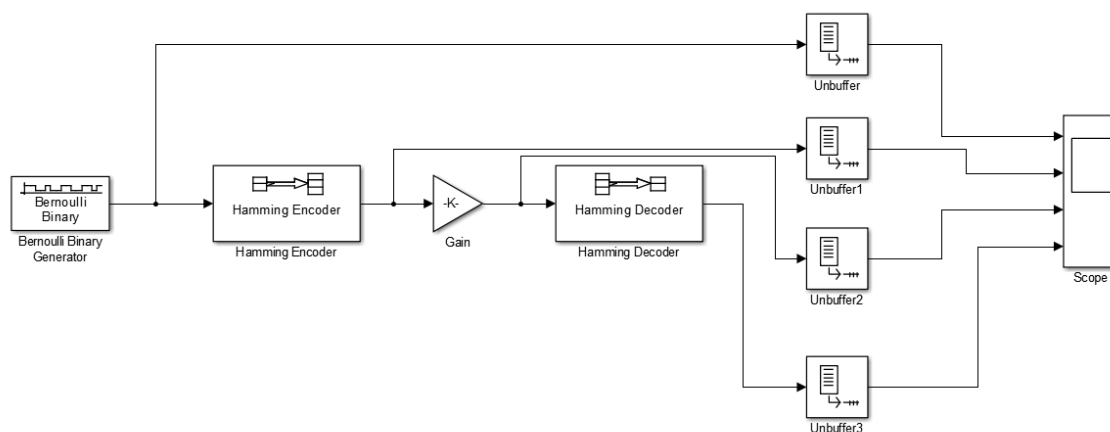


Рис. 38. Схема кодека Хэмминга

При моделировании с разными кратностями ошибок получим:

- Ошибок нет, $T0 = ER = 0$. Code_T и Code_R одинаковы (Рис. 39, а);
- Ошибка кратности $T1 = ER = 1$. Code_T и Code_R не одинаковы. Все ошибки исправлены (Рис. 39, б);
- Ошибка кратности $T2 = ER = 2$. Code_T и Code_R не одинаковы. Часть ошибок осталась (Рис. 39, в).

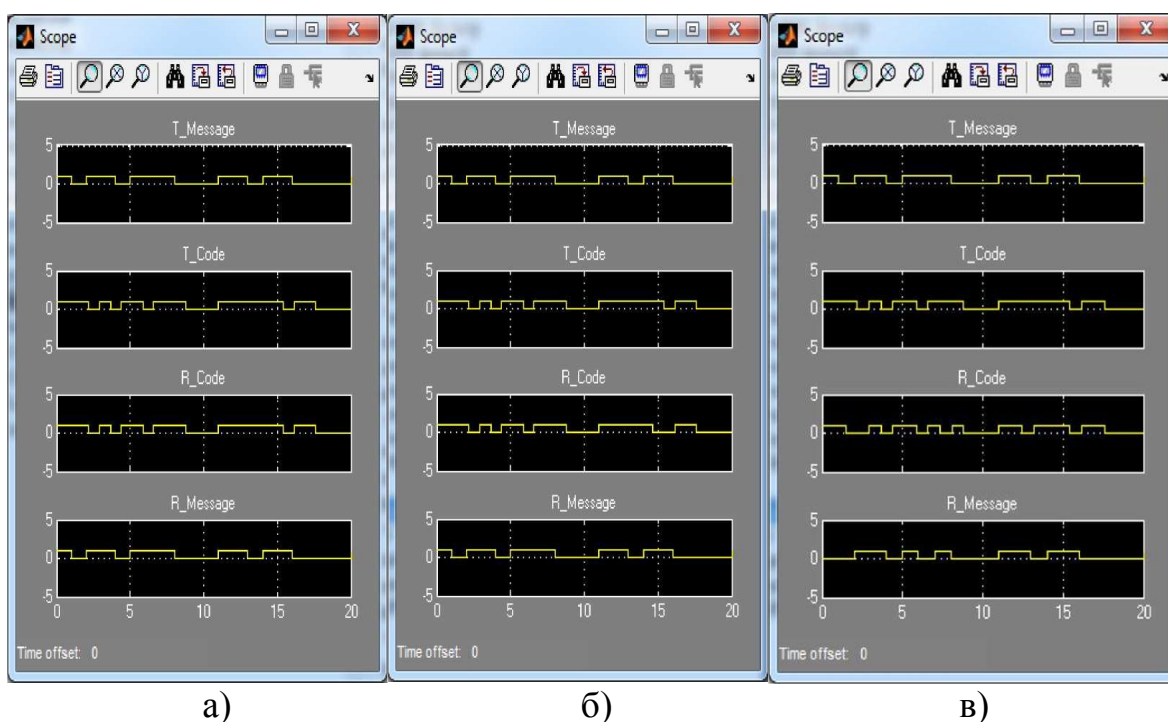


Рис. 39. Графики сигналов: а) при моделировании без ошибок; б) при ошибках кратности $T1 = ER = 1$; в) при ошибках кратности $T2 = ER = 2$

3.3.2 КОДЕК ВСН

Далее необходимо выполнить моделирование кодека ВСН без ошибок $TO=0$ и с ошибками с кратностью $T1 = 4$, $T2=5$. Для этого создаем модель в среде Simulink (рис. 40).

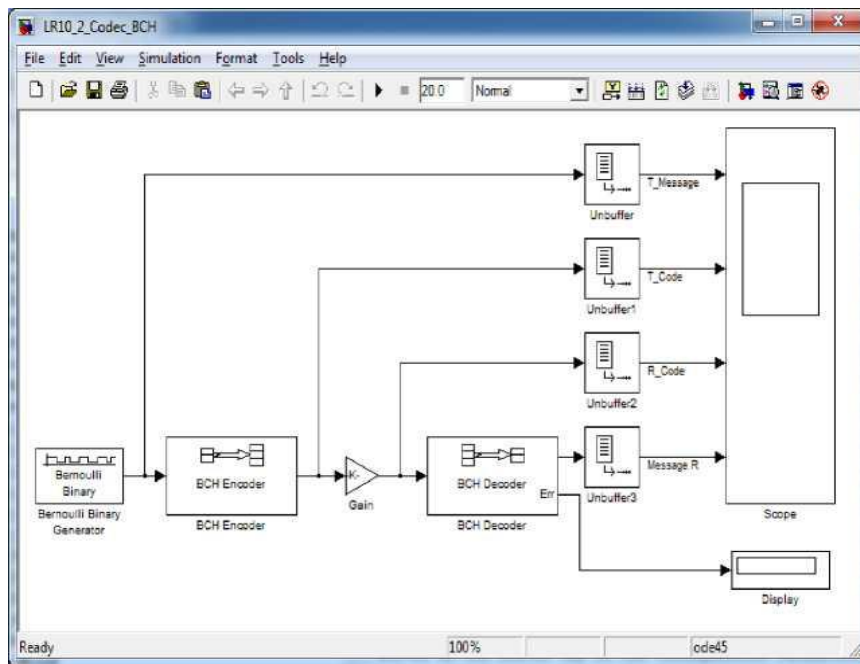


Рис. 40. Схема Кодека BCH

При моделировании с разными кратностями ошибок получим:

- Ошибок нет, $T0 = ER = 0$. Code_T и Code_R одинаковы. Дисплей отображает 0 (рис. 41, а);
- Ошибка кратности $T1 = ER = 4$. Code_T и Code_R не одинаковы. Все ошибки исправлены. Дисплей отображает их количество (2) (рис. 41, б);
- Ошибка кратности $T2 = ER = 8$. Code_T и Code_R не одинаковы. Часть ошибок осталась. Дисплей отображает этот факт числом со знаком минус (-1) (рис. 41, в).

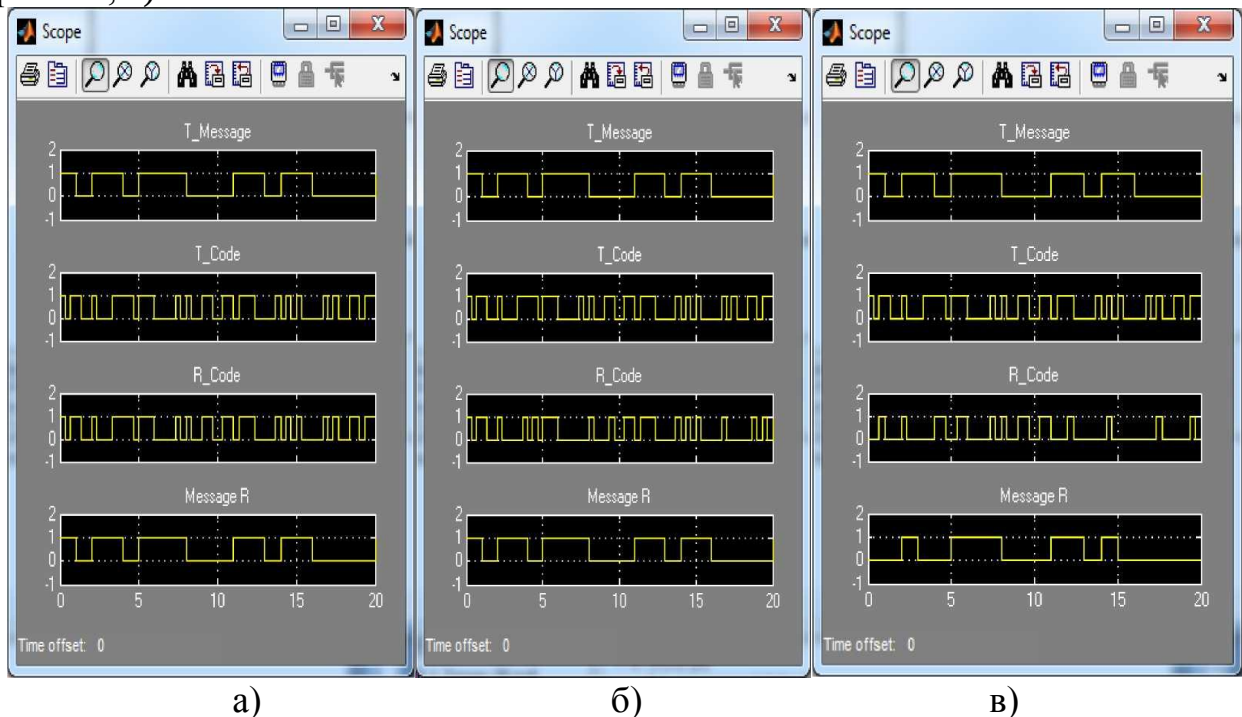


Рис. 41. Графики сигналов: а) при моделировании без ошибок; б) при ошибках кратности $T1 = ER = 4$; в) при ошибках кратности $T2 = ER = 8$

3.3.3. КОДЕК РИДА-СОЛОМОНА

Далее необходимо выполнить моделирование кодера Рида-Соломона RS без ошибок $T_0=0$ и с ошибками с кратностью $T_1 = 4$, $T_2 = 8$. Для этого создаем модель в среде Simulink (рис. 42).

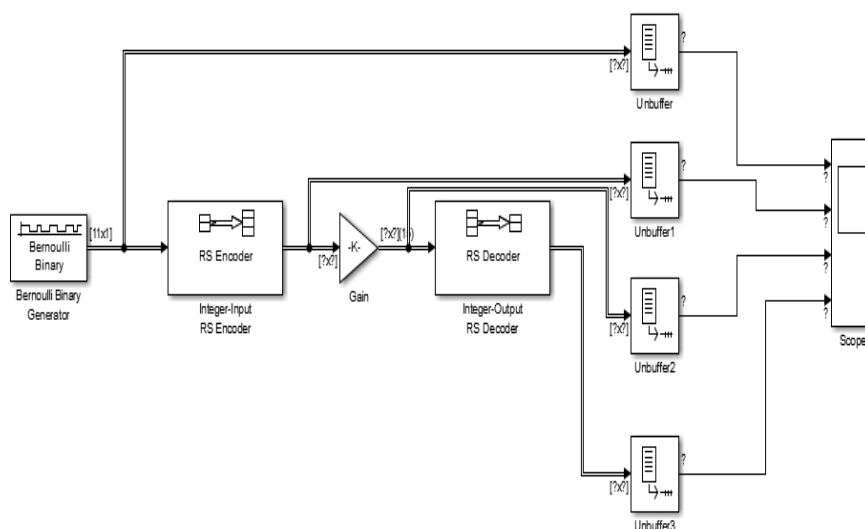


Рис. 42. Схема кодера Рида-Соломона

При моделировании с разными кратностями ошибок получим:

- Ошибок нет, $T_0 = ER = 0$. Code_T и Code_R одинаковы. Дисплей отображает 0 (рис. 43, а);
- Ошибка кратности $T_1 = ER = 5$. Code_T и Code_R не одинаковы. Все ошибки исправлены. Дисплей отображает их количество (5) (рис. 43, б);
- Ошибка кратности $T_2 = ER = 7$. Code_T и Code_R не одинаковы. Часть ошибок осталась (рис. 43, в).

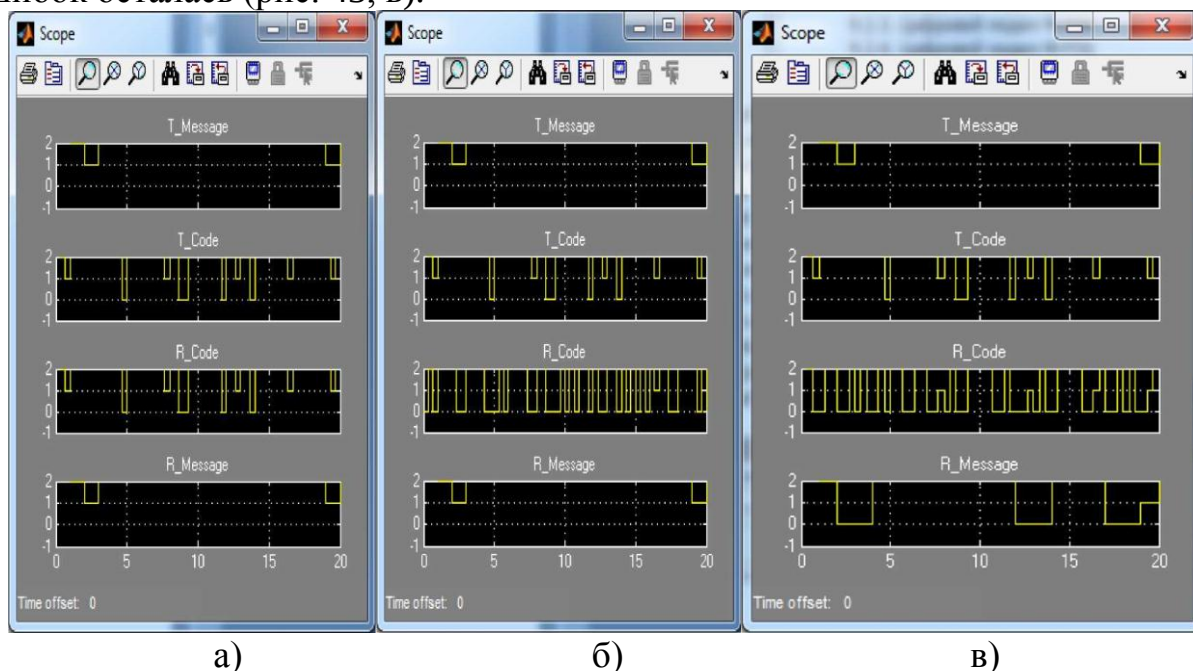


Рис. 43. Графики сигналов: а) при моделировании без ошибок; б) при ошибках кратности $T_1 = ER = 5$; в) при ошибках кратности $T_2 = ER = 7$

3.3.4. СВЕРТОЧНЫЙ КОДЕК

Далее необходимо выполнить моделирование сверточного кодера без ошибок $T_0=0$ и с ошибками с кратностью $T_1=4$, $T_2=8$. Для этого создаем модель в среде Simulink (рис. 44).

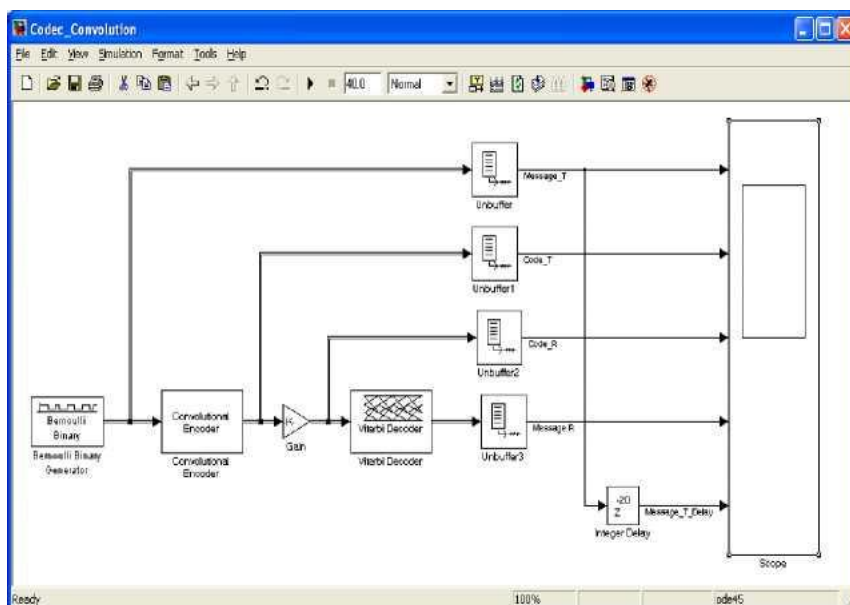


Рис. 44. Схема Сверточного кодера

В модель включаем следующие элементы.

Сверточный кодер Convolution encoder. Блок находится в Communications Blockset => Error Detection and Correction => Convolution. Он по сообщению из $K=2$ символов формирует передаваемый код V из $N=3$ символов. В окне параметров кодера нужно задать функцию генерации решетки `poly2trellis([4 3],[4 5 17; 7 4 2])` (рис. 45).

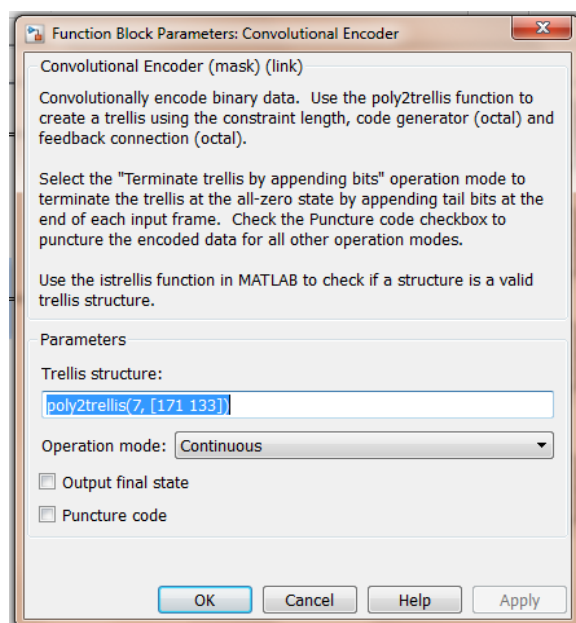


Рис. 45. Окно параметров кодера

Умножитель Gain. Блок находится в Simulink => Math Functions. Он умножает выход кодера на вектор ошибки E из 0 и 1, имитирующий ошибки в канале связи (ошибка может получиться при компоненте E , равном 0). Вектор E должен содержать N компонент, которые вычислим функцией $\text{rot90}(\text{randerr}(N,1,N - ER))$ (рис. 46). Получим вектор-строку из N равновероятных нулей и единиц, из которых $N - ER$ равны 1.

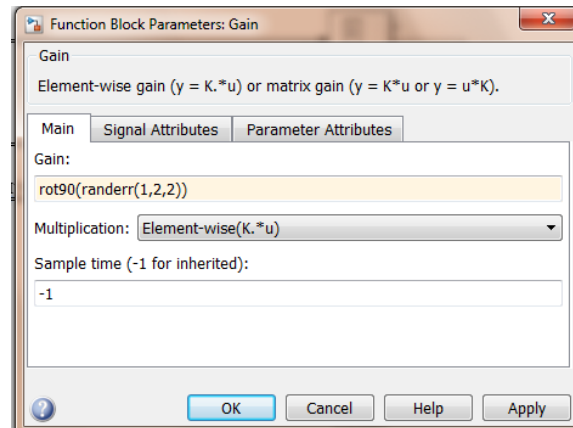


Рис. 46. Окно параметров умножителя

Сверточный декодер - Convolution decoder. Блок находится в Communications Blockset => Error Detection and Correction => Convolution. Он декодирует сообщение, используя алгоритм Витерби. В окне параметров блока нужно повторить решетку, выбрать декодирование с жестким решением (Hard Decision) и глубину отслеживания назад примерно $3(K+N)$. В поле глубина слежения (Traceback Depth) задаем 10. Это означает, что декодированное сообщение будет создаваться со сдвигом на 10 тактов (рис. 47).

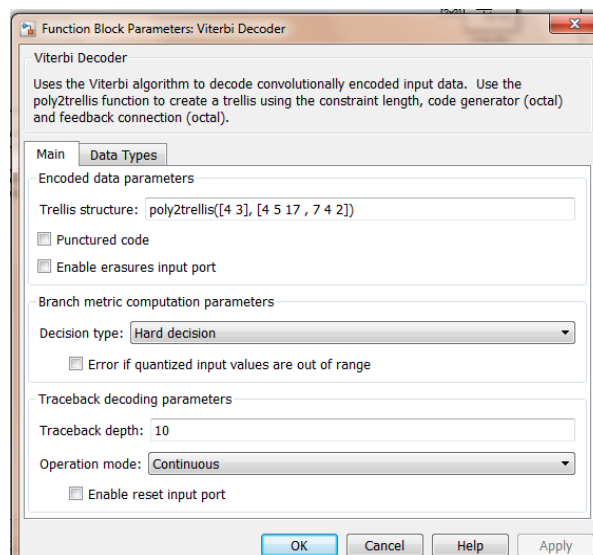


Рис. 47. Окно параметров декодера

Блок Unbuffer. Блок находится в Signal Processing Blockset => Signal management => Buffers. Они преобразуют фреймы в линейные последовательности, направляемые к виртуальному наблюдателю Scope.

Блок задержки Integer Delay. Блок находится в Simulink => Discrete. Он задерживает Message_T на время обработки в декодере, чтобы наглядно сравнивать переданное и принятое сообщения.

Наблюдатель Scope. Блок находится в Simulink => Sinks. Он позволяет в общем масштабе времени наблюдать сигналы от блоков Buffer. Чтобы в графиках наблюдателя были заголовки, сделаем входам имена. Для этого двойным щелчком по линии входа вызовем окно ввода имени, в которое занесем имя.

Необходимо задать имена:

- для передаваемого сообщения - T_Message;
- для передаваемого кода T_Code;
- для принятого кода - R_Code;
- для декодированного сообщения R_Message;
- для задержанного передаваемого сообщения - T_Message_Delay.

При моделировании с разными кратностями ошибок получим следующие результаты.

Случай когда ошибок нет, $T_0=ER=0$. T_Code и R_Code одинаковы. R_Message совпадает с T_Message, но сдвинуто на 10 тактов (рис. 48).

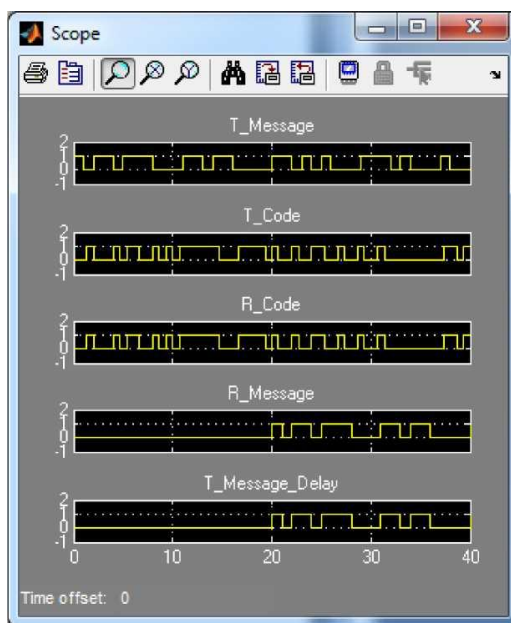


Рис. 48. Графики сигналов $T_0=ER=0$

Случай когда ошибка кратности $T_1=ER=1$. T_Code и R_Code не одинаковы. R_Message не совпадает с T_Message, и сдвинуто на 10 тактов. Ошибки исправлены не полностью. Сверточный кодек хорошо работает только при редких ошибках, а в модели их вероятность 1/3 (рис. 50).

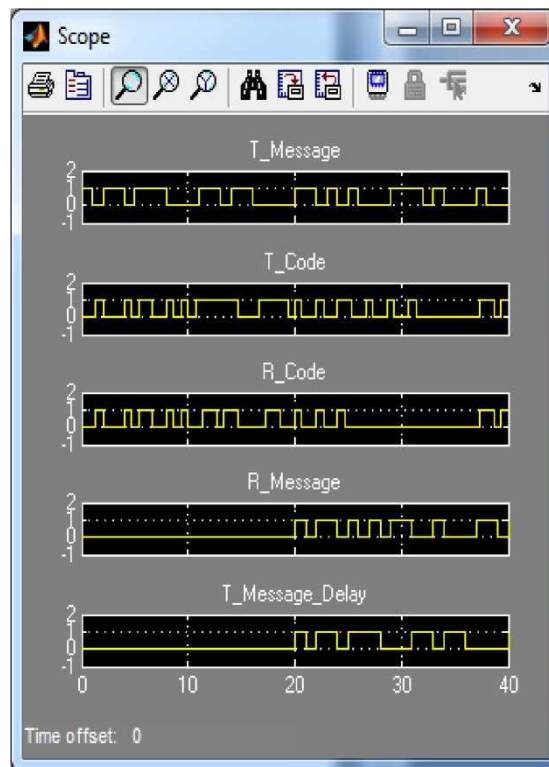


Рис. 49. Графики сигналов при $T_1=ER=1$

После подготовки отчета по лабораторной работе необходимо подготовить ответы по следующим контрольным вопросам: Назначение помехоустойчивых кодов; Коды с контролем четности; Блочные коды; Кодек Хэмминга; Циклические блочные коды; Кодек BCH; Кодек Рида-Соломона; Сверточный код.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данные методические указания направлены на изучение аналоговых и цифровых модемов различного типа, а также канальных кодеров. В процессе выполнения заданий рассматривается работа различных модемов и кодеров. Моделируются цифровые и аналоговые модемы, рассматриваются графики сигналов при различных уровнях зашумленности канала связи, оценивается эффективность работы различных кодеров при разных кратностях ошибок. При необходимости углубить теоретические знания по рассмотренным темам следует обратиться к библиографическому списку.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Прокис. Дж. Цифровая связь / пер. с англ. ред. Д. Д. Кловский – М.: Радио и связь, 2000.
2. Васильев К. К. Служивый М.Н. Математическое моделирование систем связи. / К. К. Васильев – Ульяновск, УлГТУ, 2007.
3. Дьяконов В. П. Simulink 4. Специальный справочник. / Дьяконов В. П. – СПб.: Питер, 2002.
4. Дьяконов В.П. MATLAB. Анализ, идентификация и моделирование систем. Специальный справочник. / Дьяконов В. П. – СПб.: Питер, 2002.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7. АНАЛОГОВЫЙ МОДЕМ	3
1.1. Цель работы	3
1.2. Краткие теоретические сведения.....	3
1.3. Задания для выполнения	4
1.4. Ход выполнения работы.....	4
1.4.1. Аналоговый модем DSBSC	6
1.4.2. Аналоговый модем SSB.....	7
1.4.3. Аналоговый модем FM.....	9
1.4.4. Аналоговый модем PM.....	10
2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №8. ЦИФРОВЫЕ МОДЕМЫ.....	12
2.1. Цель работы и краткие теоретические сведения	12
2.2. Задание для выполнения	13
2.3. Выполнение работы	14
2.3.1. Цифровой модем BPSK	14
2.3.2. Цифровой модем QPSK.....	16
2.3.3. Цифровой модем M-PSK.....	18
2.3.4. Цифровой модем M-FSK.....	19
2.3.5. Цифровой модем M-PSK.....	21
2.3.6. Цифровой RECT_QAM модем.....	22
3. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №9 . КАНАЛЬНЫЕ КОДЕКИ.....	23
3.1. Цель работы и краткие теоретические сведения	23
3.2. Задание для выполнения	25
3.3. Выполнение работы	26
3.3.1. Кодек Хэмминга	26
3.3.2. Кодек BCH.....	27
3.3.3. Кодек Рида-Соломона.....	29
3.3.4. Сверточный код	30
Заключение.....	33
Библиографический список.....	34

Основы теории радиосистем передачи информации

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

*к выполнению лабораторных работ № 7 - 9
для студентов специальности 11.05.01
«Радиоэлектронные системы и комплексы»
очной формы обучения*

Составитель
Журавлёв Дмитрий Владимирович

В авторской редакции

Подписано к изданию 15.09.2022.
Уч.-изд. л. 2,0.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»
394006 Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84