

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Кафедра радиотехнических устройств

В. В. Дубровский, А. Е. Курочкин

**ТЕОРИЯ ЦИФРОВОЙ РАДИОСВЯЗИ И
КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ УСТРОЙСТВ**

Лабораторный практикум
для студентов специальности 1-39 01 01-02
Радиотехника (техника цифровой радиосвязи)
дневной формы обучения

Минск БГУИР 2010

УДК [621.396 + 004.94](076.5)
ББК 32.884.1я73 + 32.973.26-018.2я73
Д79

Рецензент

заведующий кафедрой телекоммуникационных систем ВГКС,
кандидат технических наук, доцент, К. И. Пирогов

Дубровский В. В.

Д79 Теория цифровой радиосвязи и компьютерное моделирование цифровых устройств: лаб. практикум для студ. спец. «Радиотехника» (техника цифровой радиосвязи) дневной формы обучения / В. В. Дубровский, А. Е. Курочкин. – Минск: БГУИР, 2010. – 58 с.: ил.
ISBN 978–985–488–624–4

Приводятся краткие теоретические сведения и описания восьми лабораторных работ для исследования базовых функциональных преобразований сигнала в системах цифровой радиосвязи. На основе численных моделей устройств и систем осуществляется количественное измерение качественных показателей элементов телекоммуникационных систем.

Предназначен для студентов специальности «Радиотехника».

**УДК [621.396 + 004.94](076.5)
ББК 32.884.1я73 + 32.973.26-
018.2я73**

ISBN 978–985–488–624–4

© Дубровский, В. В., Курочкин А. Е., 2010
© УО «Белорусский государственный
университет информатики
и радиоэлектроники», 2010

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1. Исследование многолучевых каналов с частотно-временной избирательностью	6
2. Формирование и обработка сигналов с амплитудной манипуляцией	14
3. Формирование и обработка сигналов с фазовой манипуляцией	21
4. Формирование и обработка сигналов с частотной манипуляцией	38
5. Свёрточное кодирование сигналов	36
6. Алгоритм Витерби для декодирования сигналов	40
7. Кодовое уплотнение каналов	44
8. Алгоритмы слежения за фазой колебания	51
Литература	57

ВВЕДЕНИЕ

Теория цифровой радиосвязи и компьютерное моделирование цифровых устройств (ТЦРСиКМЦУ) – это фундаментальная дисциплина, определяющая своим содержанием изучение теоретических основ функционирования и методов численного моделирования систем цифровой радиосвязи (СЦРС), что позволит эффективно проектировать, эксплуатировать и модернизировать цифровые телекоммуникационные системы и устройства.

В рамках данной дисциплины предполагается изучение следующих вопросов:

- математические модели канала передачи информации и их характеристики;
- основы математической теории связи;
- кодирование источника полезного сигнала;
- канальное кодирование;
- принципы и техника цифровой модуляции;
- методы демодуляции и декодирования сигналов;
- схемо- и системотехническое построение СЦРС;
- анализ физических процессов в устройствах и системах цифровой радиосвязи.

Отдельно рассмотрены вопросы эффективного численного моделирования систем и устройств цифровой радиосвязи. В дисциплине при рассмотрении вышеуказанных вопросов и при решении необходимого круга задач используется современный математический аппарат.

Необходимость изучения теории цифровой радиосвязи

История цифровой радиосвязи непосредственно связана с развитием цифровой интегральной микросхемотехники и насчитывает около 50 лет. Цифровые методы обработки и передачи информации прочно утвердились в современном обществе и оказывают решающее влияние на тенденции развития средств связи.

В настоящее время в связи с развитием микропроцессорной техники уже созданы многочисленные цифровые системы передачи информации (СПИ) как общего, так и специального назначения. Подобные системы обладают более высокими техническими и эксплуатационными характеристиками по сравнению с аналоговыми. Для систем с множественным доступом создано цифровое коммутационное оборудование под управлением специализированных вычислительных систем. Таким образом, весь аппаратный комплекс сетей связи реализован исключительно на цифровой основе. При этом параметры каналов практически не зависят от структуры сети связи, что обеспечивает гибкость и надёжность цифровой передачи информации.

Круг вопросов, с которыми приходится сталкиваться специалистам, занимающимся проектированием, производством и эксплуатацией СЦРС, широк. Необходимо хорошо разбираться в стандартизации и терминологии СЦРС, представлять принципиальные или проблемные вопросы, связанные с проектированием и эксплуатацией указанных систем. Кроме того, современному радиоинженеру приходится сталкиваться с огромным количеством различных по функциональному назначению устройств и систем формирования, передачи, извлечения, обработки и хранения информации. При всём своём многообразии, принципы работы для всех функциональных блоков СЦРС одинаковы.

К XXI-му столетию уже сложились базовые принципы цифровой передачи, приёма и обработки информации, а именно: кодирование источника информации и компрессия информационного потока, канальное и помехоустойчивое кодирование, модуляция, демодуляция и т. д. Дальнейшее развитие СЦРС направлено на улучшение их качественных показателей за счёт применения новых сигнально-кодовых конструкций, повышения уровня сжатия информационного потока, использования оптимальных с точки зрения помехоустойчивости алгоритмов обработки принимаемого сигнала.

Успешное освоение теории цифровой радиосвязи необходимо для глубокого понимания всего многообразия методов цифровой обработки сигналов, используемых в СЦРС.

1. ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОЛУЧЕВЫХ КАНАЛОВ С ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННОЙ ИЗБИРАТЕЛЬНОСТЬЮ

ВВОДНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Многолучевый канал (МЛК) связи с частотно-временной избирательностью – наиболее адекватная модель каналов передачи информации, используемых в системах радиосвязи. Модель отражает многопутевое распространение радиоволн, задержку сигнала во времени, доплеровский сдвиг частоты, что чаще всего является результатом взаимного движения между передающим и приёмным устройствами. Многолучевый канал есть дисперсионный канал с замираниями (ДКЗ).

Моделирование ДКЗ основано на использовании сведений о расчётных физических или наблюдаемых параметрах канала. В середине 60-х г.г. прошлого века использовалась детерминированная параметры модели канала (время задержки сигнала, коэффициент передачи). В последствии оказалось, что эффективнее вводить в модель изменяемые во времени параметры, что хорошо согласовалось с нестационарной природой канала с замираниями.

ДКЗ описывается как линейный фильтр с изменяющимися во времени параметрами. На параметры математической модели канала передачи информации влияют не только физические характеристики среды распространения радиоволн, но и подвижность приёмного (передающего) устройства. В системах подвижной радиосвязи сигнал в точке приёма состоит из суммы сигналов, приходящих несколькими путями за счёт отражений от различных природных и искусственных объектов. Такой механизм формирования сигнала в антенне приёмника есть результат прохождения сигнала через *многолучевый канал* связи. Сигнал, прошедший через МЛК, представляет собой гауссовский случайный процесс с нулевым математическим ожиданием, что следует из центральной предельной теоремы А. М. Ляпунова. В этом случае полное описание канала связи сводится к определению комплексного коэффициента передачи канала, из которого находится корреляционная функция или спектральная плотность мощности сигнала в точке приёма.

Геометрия двухлучевого распространения радиоволн в канале связи

На рисунке 1.1 изображена геометрия распространения радиоволны для случая двух путей прихода сигнала в точку приёма.

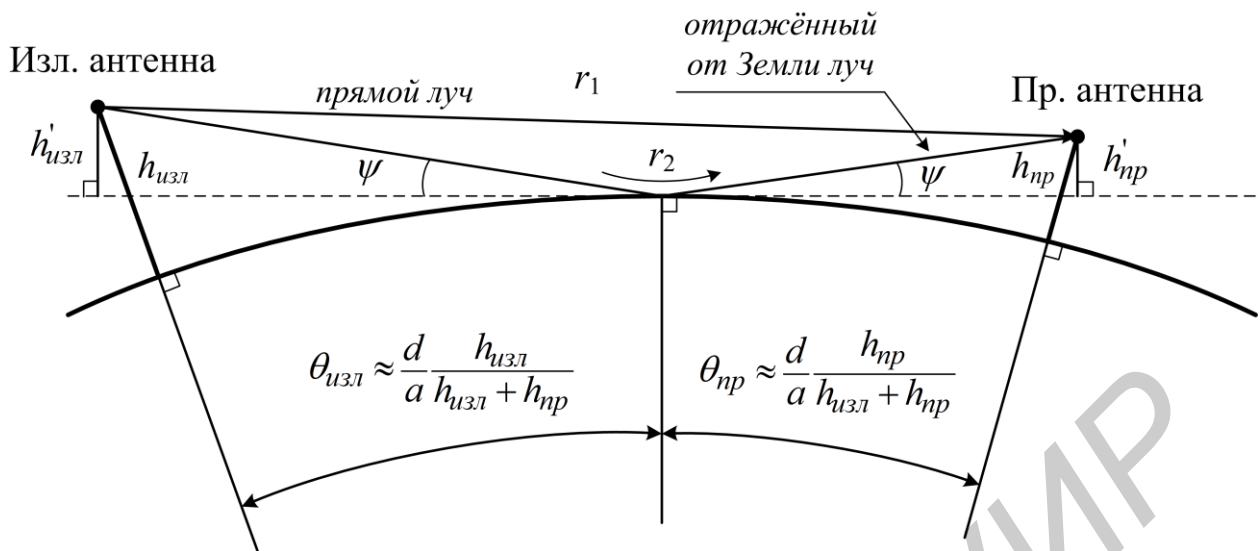


Рис. 1.1

Длина прямого пути – r_1 . Второй путь образуется из падающего на поверхность Земли луча и луча отражённого от неё. Длина пройденного радиоволной пути в этом случае равна r_2 .

Очевидно, в точке приёма сигнала будет наблюдаться сложение полей двух лучей. Сигналы прямого и отражённого лучей будут различаться по амплитуде и фазе. Для того чтобы определить коэффициент передачи канала связи, приведём геометрию задачи для плоской и гладкой подстилающей поверхности (см. рис. 1.2).

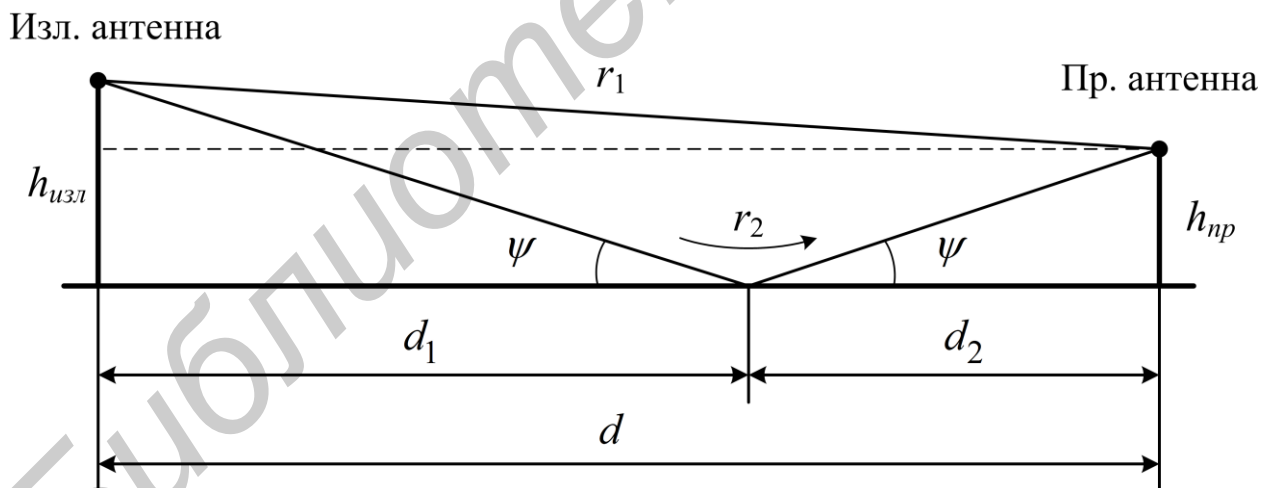


Рис. 1.2

При отражении радиосигнала от плоской подстилающей поверхности (Земля, водная гладь) для горизонтально поляризованной волны происходит поворот фазы электрического поля на 180° . Если длины путей r_1 и r_2 приблизительно равны, то приходящие с двух направлений сигналы складываются в противофазе, что может привести к сильному подавлению полезного сигнала. Подобная интерференционная картина наблюдается в

случае, если высоты излучающей и приёмной антенн невелики в сравнении с расстоянием между ними. Однако отражённый луч всегда слабее прямого из-за рассеяния энергии падающей на поверхность волны. Указанные два фактора при оценке характеристик канала вступают в противодействие друг с другом, поэтому при анализе канала с замираниями в условиях прямой видимости геометрическая модель, изображённая на рисунке 1.2, даёт приемлемые с точки зрения точности результаты.

Если эффективный радиус Земли много больше высоты подвеса антенн, что характерно для большинства систем радиосвязи, то можно считать, что $h'_{изл} \approx h_{изл}$ и $h'_{пр} \approx h_{пр}$. Разница длин путей прямого и отражённого лучей определяется следующим выражением:

$$r_2 - r_1 = \sqrt{(h_{изл} + h_{пр})^2 + d^2} - \sqrt{(h_{изл} - h_{пр})^2 + d^2} \approx \approx d \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{h_{изл} + h_{пр}}{d} \right)^2 \right] - d \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{h_{изл} - h_{пр}}{d} \right)^2 \right] = \frac{2h_{изл}h_{пр}}{d}. \quad (1.1)$$

Разница в длине путей даёт следующую величину сдвига фаз электрического поля:

$$\Delta = \frac{4\pi h_{изл}h_{пр}}{\lambda d} = 1,3343\pi \times 10^{-5} \frac{f_{[МГц]} h_{изл} h_{пр}}{d_{[км]}}, \quad (1.2)$$

где λ – средняя длина волны сигнала.

Угол падения волны ψ на подстилающую поверхность

$$\psi = \arctg \left[\frac{h_{изл}}{d_1} \right] = h_{изл} \frac{h_{изл} + h_{пр}}{h_{изл} d} = \frac{h_{изл} + h_{пр}}{d}. \quad (1.3)$$

Для диапазонов ОВЧ и УВЧ квадрат отношения значений электрического поля для двухпутёвого распространения и распространения в свободном пространстве определяется следующим выражением:

$$\left| \frac{E_{пр}}{E_{св}} \right|^2 \approx |1 + \mathbf{R} \exp j\Delta|^2 = 1 + |\mathbf{R}|^2 + 2|\mathbf{R}| \cos \Delta + \xi, \quad (1.4)$$

где \mathbf{R} – комплексный коэффициент отражения, определяемый через угол отражения ψ и комплексное волновое сопротивление подстилающей поверхности \mathbf{z} .

$$\mathbf{R} = \frac{\sin \psi - \mathbf{z}}{\sin \psi + \mathbf{z}} \equiv |\mathbf{R}| \exp j\xi. \quad (1.5)$$

$$\mathbf{z} = \begin{cases} \sqrt{\epsilon_{пов} - \cos^2 \psi} \approx \sqrt{\epsilon_{пов} - 1}, & (\text{горизонтальная поляризация}); \\ \sqrt{\epsilon_{пов} - \cos^2 \psi} \approx \sqrt{\epsilon_{пов} - 1} / \epsilon_{пов}, & (\text{вертикальная поляризация}). \end{cases} \quad (1.6)$$

Здесь $\epsilon_{\text{пов}}$ – комплексная диэлектрическая постоянная частично проводящей поверхности, определяемая следующим образом:

$$\epsilon_{\text{пов}} = \epsilon - j \frac{\sigma}{2\pi f \epsilon_0} = \epsilon - 1,796 \times 10^4 \frac{j\sigma}{f_{[\text{МГц}]}} \quad (1.7)$$

где ϵ и σ – относительные диэлектрическая проницаемость и проводимость подстилающей поверхности.

Типичные значения параметров земной поверхности следующие: $\epsilon = 15$, $\sigma = 0,005$, что даёт $\epsilon_{\text{пов}} = 15 - j90/f_{[\text{МГц}]}$. На рисунках 1.3 и 1.4 приведены модуль и аргумент величины \mathbf{z} для горизонтально и вертикально поляризованной волны соответственно.

Из графиков следует, что для частот сигнала выше 100 МГц и при малых углах падения волны ψ коэффициент отражения \mathbf{R} становится приблизительно равным минус 1. Следовательно выражение (1.4) можно упростить:

$$\left| \frac{E_{\text{нр}}}{E_{\text{св}}} \right|^2 \approx 2(1 - \cos \Delta) = 4 \sin^2 \left[\frac{\Delta}{2} \right] = 4 \sin^2 \left[\frac{2\pi h_{\text{изл}} h_{\text{нр}}}{\lambda d} \right]. \quad (1.8)$$

Формула позволяет определить *степень затухания сигнала в двухпутёвом канале относительно затухания при свободном распространении.*

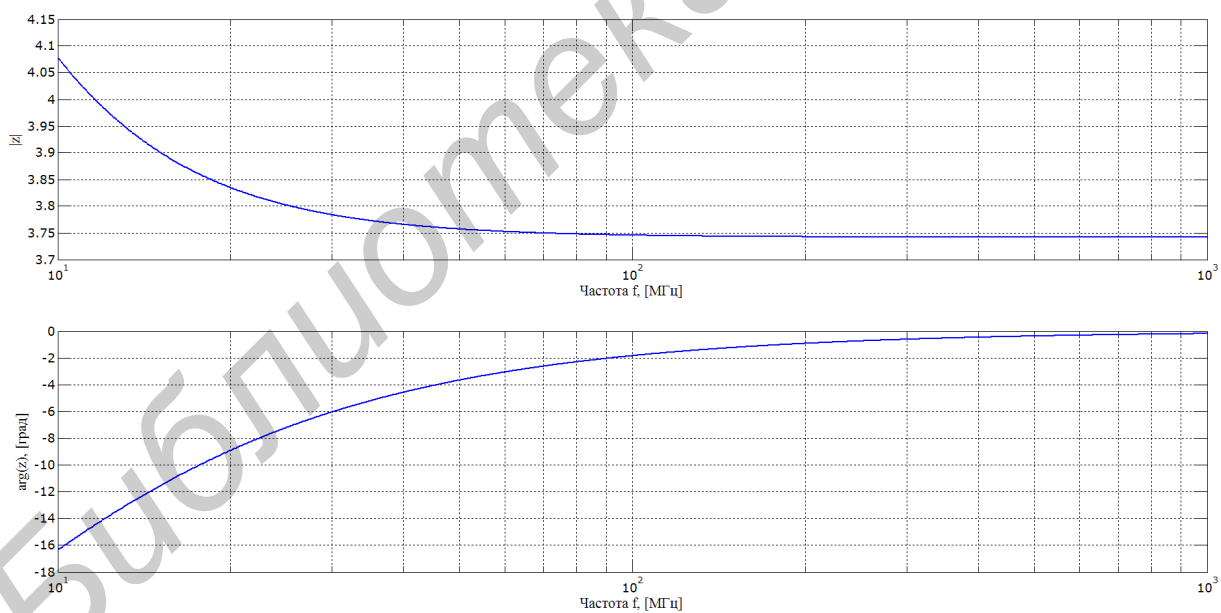


Рис. 1.3

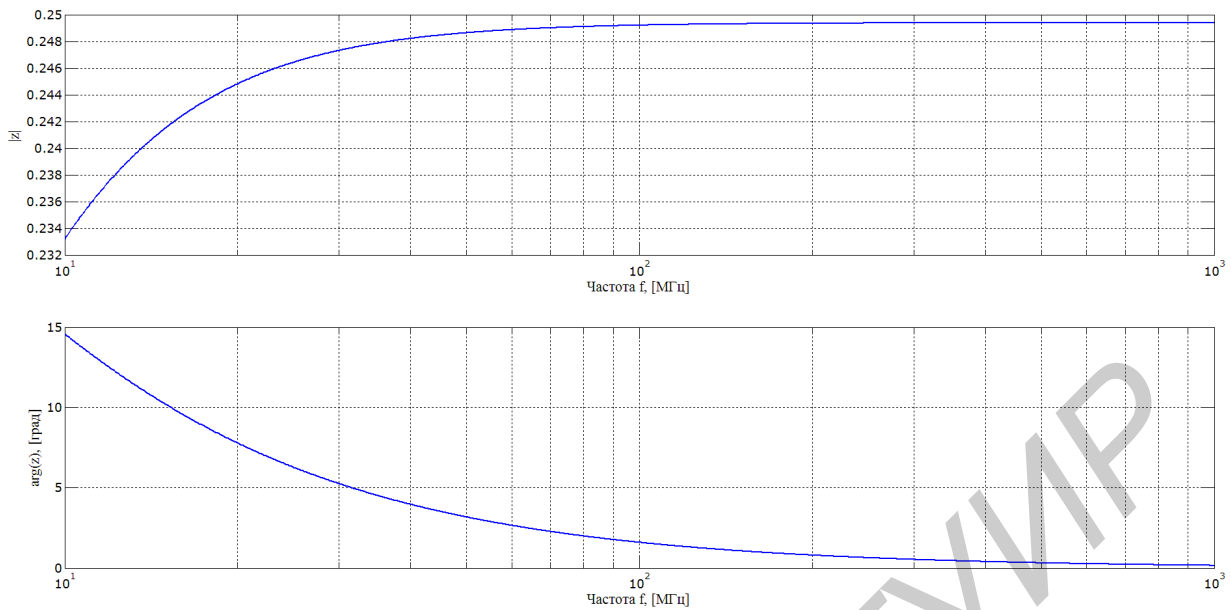


Рис. 1.4

Выводы по зависимости (1.):

1) $\left| E_{np} / E_{ce} \right|^2$ на 6 дБ больше, чем при свободном распространении, если $\Delta / 2 = \{ \pi / 2; 3\pi / 2; 5\pi / 2; \dots \}$, т. е. когда $\sin[\Delta/2] = \pm 1$.

2) $\left| E_{np} / E_{ce} \right|^2$ равно нулю, если $\Delta/2 = \{ \pi; 2\pi; 3\pi; \dots \}$, т. е. когда $\sin[\Delta/2] = 0$.

3) $\left| E_{np} / E_{ce} \right|^2$ для заданной рабочей частоты зависит от высоты антенн и/или расстояния между ними.

ОПИСАНИЕ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ

Модель создана в среде Simulink (см. рис. 1.5) и содержит следующие структурные компоненты:

- источник информационного потока (bit source);
- формирователь сигнала с квадратурной фазовой манипуляцией (QPSK modulator);
- блок, моделирующий канал с релеевскими замираниями (multipath Rayleigh fading channel);
- блок, моделирующий канал с райсовскими замираниями (multipath Rician fading channel);
- регистраторы сигнала, позволяющие строить диаграмму рассеяния комплексной амплитуды сигнала в режиме реального времени.

Multipath Rayleigh and Rician Fading Channels

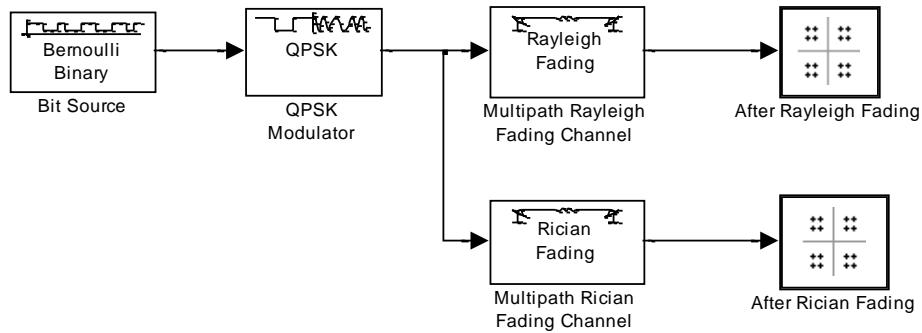


Рис. 1.5

Пространство сигналов и соответствующие им информационные биты изображены на рисунке 1.6.

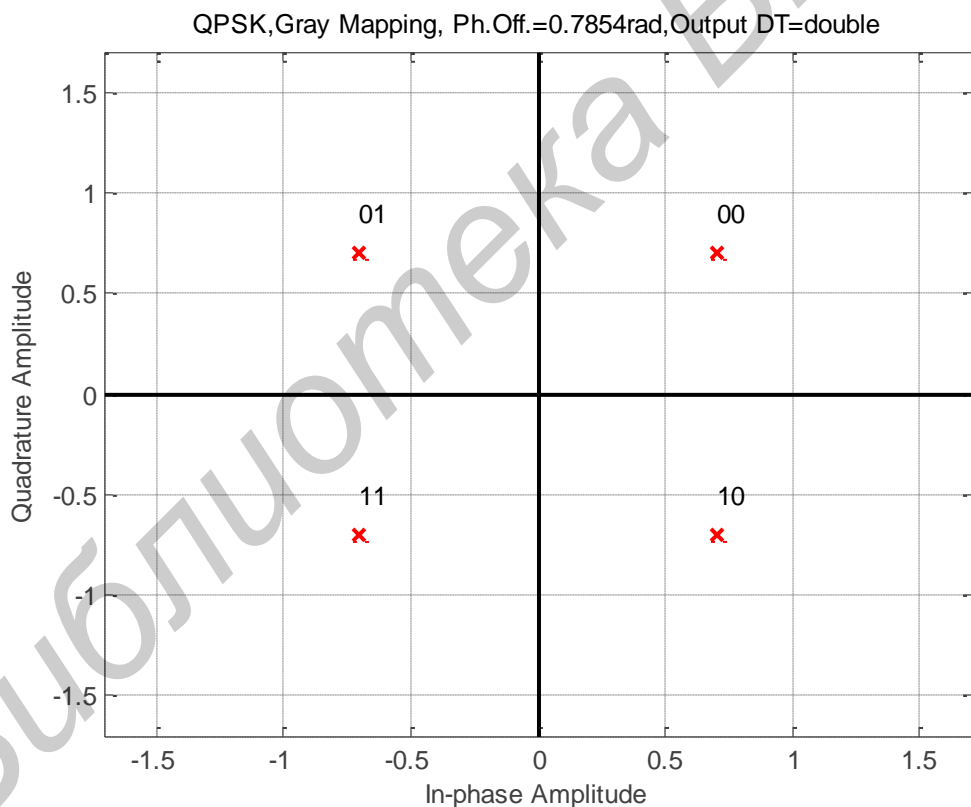


Рис. 1.6

Скорость информационного потока – 500 кбит/с; количество бит в одном пакете данных – 200.

В модели приняты следующие обозначения переменных:

1) **maxDopplerShift** – максимальное значение доплеровского сдвига частоты (по умолчанию 200 Гц);

2) **delayVector** – вектор задержек сигнала в каждом из подканалов (путей) в секундах;

3) **gainVector** – вектор средних значений коэффициентов передачи каждого из подканалов в децибелах.

4) **LOSDopplerShift** – доплеровский сдвиг частоты «главного» луча в герцах.

Параметры модели можно изменять через меню: File – Model Properties – Callbacks.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Установите следующие параметры модели:

```
bitRate = 500000;  
bitsPerFrame = 200;  
maxDopplerShift = 200;  
delayVector = [0:3]*(4e-6);  
gainVector = [0:3]*(-3);  
LOSDopplerShift = 100;  
KFactor = 10;
```

Запустите модель и через несколько секунд нажмите кнопку «Pause». Внимательно изучите и зарисуйте отображаемые графики: импульсную характеристику канала, коэффициент передачи канала, уровень сигналов на выходе канала, спектр доплеровского сдвига и др. Поясните, какие физические характеристики отложены по осям.

Исследование канала с релеевскими замираниями

1.1. Исследуйте однолучевый канал, установив следующие параметры модели:

```
bitRate = 500000;  
bitsPerFrame = 200;  
maxDopplerShift = 200;  
delayVector = [0]*(4e-6);  
gainVector = [0]*(-3);  
LOSDopplerShift = 10;  
KFactor = 10;
```

Изменяя значение **LOSDopplerShift** от 0 до 250 с шагом 50 Гц, зарисуйте частотную и импульсную характеристики канала. Укажите, что изменяется на графиках и почему.

Изобразите сигнальное созвездие, выполнив двойной щелчок на блоке Scatter Plot Scope во время вычислений.

Исследуйте влияние параметра `delayVector` и `gainVector` на характеристики канала, изменяя параметр `delayVector` в пределах от 0 до 10^{-5} , а `gainVector` – от 0 до 12.

1.2. Исследуйте двухлучевой канал, установив следующие параметры модели:

```
bitRate = 500000;  
bitsPerFrame = 200;  
maxDopplerShift = 200;  
delayVector = [0; 1]*(4e-6);  
gainVector = [0; 1]*(-3);  
LOSDopplerShift = 200;  
KFactor = 10;
```

Опытным путём определите глубину замираний канала (минимальное значение коэффициент передачи). Определите максимальный коэффициент передачи канала. Чем можно объяснить результаты?

Исследуйте влияние на импульсную характеристику и коэффициент передачи параметров `maxDopplerShift`, `LOSDopplerShift`.

Изменяя задержку и средний коэффициент передачи второго луча, определите их влияние на характеристики канала. Указанные параметры первого луча должны быть равны нулю.

Для одного из вариантов параметров изобразите спектр доплеровского сдвига частоты. Изучите сигнальное созвездие.

1.3. Исследуйте четырехлучевой канал, установив следующие параметры модели:

```
bitRate = 500000;  
bitsPerFrame = 200;  
maxDopplerShift = 200;  
delayVector = [0:3]*(4e-6);  
gainVector = [0:3]*(-3);  
LOSDopplerShift = 100;  
KFactor = 10;
```

Для указанных параметров модели определите глубину замираний и максимальный коэффициент передачи канала.

Изменяя параметр `delayVector` от $[0:3]*(1e-6)$ до $[0:3]*(10e-6)$, исследуйте его влияние на коэффициент передачи канала. То же самое проделайте с параметром `gainVector`, изменяя от $[0:3]*(-1)$ до $[0:3]*(-5)$.

Исследование канала с райсовскими замираниями

Двойным щелчком мыши по блоку «Rayleigh Fading» откройте его свойства. Снимите галочку «Open channel visualization at start of simulation». Установите аналогичную галочку в свойствах блока «Rician Fading».

Повторите п.п. 1.1–1.3 для канала с райсовскими замираниями.

2. ФОРМИРОВАНИЕ И ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ С АМПЛИТУДНОЙ МАНИПУЛЯЦИЕЙ

ВВОДНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Численная модель позволяет формировать и осуществлять оптимальную обработку сигнала с амплитудной манипуляцией (АМн):

$$s(t) = A_i \cos \omega_0 t + \varphi_0, \quad A_i \in [0; M - 1], \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad (2.1)$$

где M – количество сигналов в сигнальном пространстве (см. рис. 2.1).

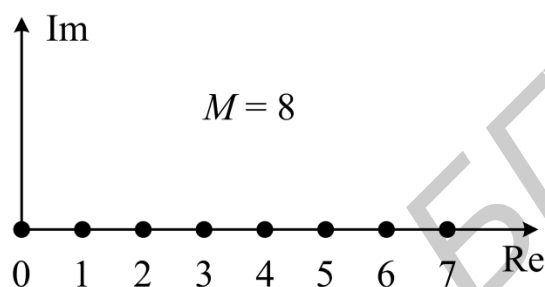


Рис. 2.1

Модель позволяет оценивать помехоустойчивость обработки сигнала при наличии аддитивных и мультипликативных помех в канале связи.

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Модель состоит из следующих крупных структурных элементов.

1) Формирователь сигнала (модулятор) изображён на рисунке 2.2.

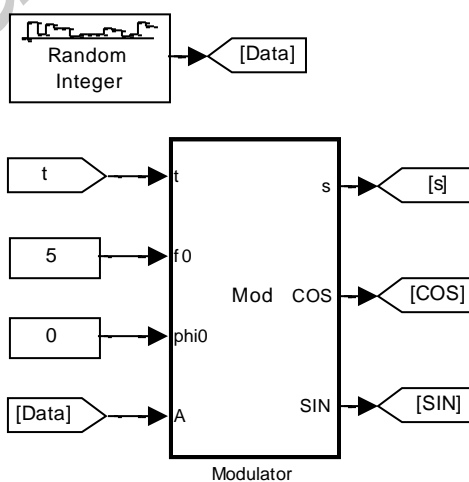


Рис. 2.2

На рисунке 2.2: «t» – время; «f0» – частота несущего колебания; «phi0» – начальная фаза несущего колебания; «Data» – M-уровневый сигнал, представляющий информационный поток.

2) Формирователь комплекса помех (рис. 2.3)

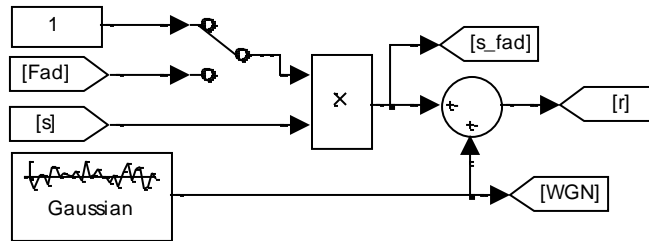


Рис. 2.3

В устройстве осуществляется перемножение сигнала и мультипликативной помехи с последующим подмешиванием аддитивной помехи в виде белого гауссовского шума (БГШ):

$$r(t) = \mu(t)s(t) + n(t), \quad (2.2)$$

где $\mu(t)$ – мультипликативная помеха; $n(t)$ – БГШ.

3) Генератор мультипликативной помехи (рис. 2.4)

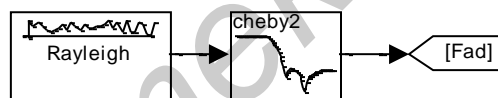


Рис. 2.4

Генератор состоит из источника случайных чисел с распределением Релея и фильтра нижних частот, задающего максимальную частоту амплитудных флуктуаций сигнала.

4) Устройство приёма и обработки сигнала (рис. 2.5)

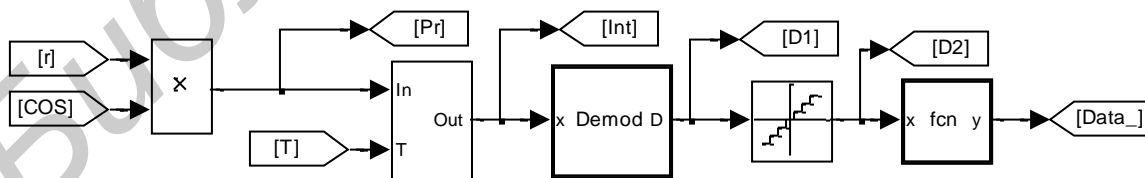


Рис. 2.5

5) Измерительные системы и системы визуализации (рис. 2.6–2.10)

Измеритель отношения сигнал-шум (С/Ш) в канале связи: E_s/N_0 , где E_s – средняя энергия одного символа; N_0 – односторонняя спектральная плотность мощности БГШ.

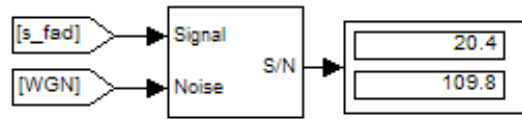


Рис. 2.6

Отношение С/Ш измеряется в полосе сигнала $\Delta f = f_0 - 1/\tau_s; f_0 + 1/\tau_s$, где τ_s – длительность элемента информационного сигнала. Верхнее значение на устройстве индикации в дБ, нижнее – в размах.

Измеритель математического ожидания и среднеквадратического отклонения (СКО) мультипликативной помехи

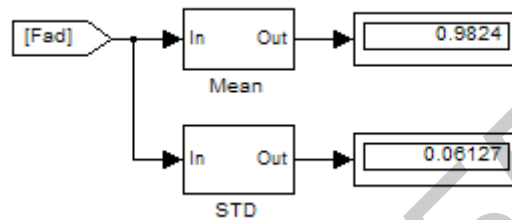


Рис. 2.6

Счётчик количества ошибок приёма символов на интервале наблюдения

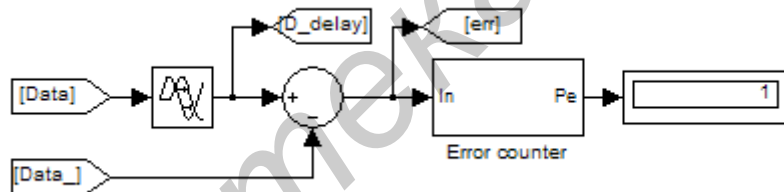


Рис. 2.8

Счётчик количества ошибочных бит информации на интервале наблюдения

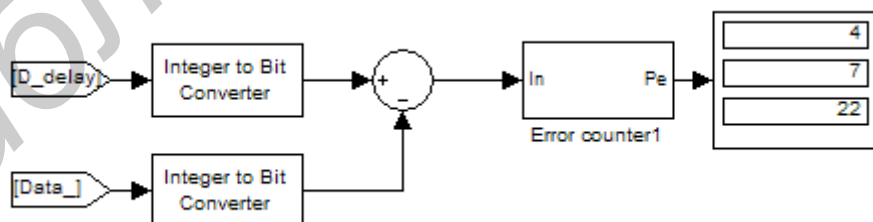


Рис. 2.9

Осциллографы, позволяющие наблюдать реализации сигнала после каждого функционального элемента модели.

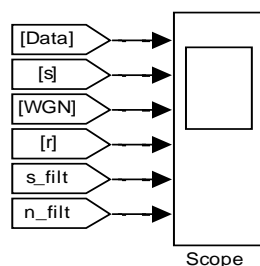


Рис. 2.10

ЗАМЕЧАНИЕ

Понятия «время» и «частота» в модели удобно интерпретировать как обобщённые параметры: важны не их абсолютные значения, а соотношения между сравнимыми характеристиками. Так, если 1 единицу времени в модели интерпретировать как 1 мкс, то все значения частот будут в МГц.

Значения сигналов можно интерпретировать в вольтах или амперах с любыми приставками-множителями. В дальнейшем единицы измерения уточняться не будут и по умолчанию время будет измеряться в секундах, частота – в герцах, сигнал – в вольтах.

Общий вид модели приведён на рисунке 2.11.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

2.1. Составление структурной и функциональной схем численной модели

Внимательно изучите каждый элемент модели. Посмотрите, какие параметры задают функциональность блоков, поясните их физический смысл. Как осуществляется амплитудная манипуляция? Что в модели формирует сообщение? Как осуществляется демодуляция сигнала? Укажите назначение элементов, составьте структурную и функциональную схемы передающего устройства и приёмного устройства

2.2. Осциллограммы в точках схемы

Установите значение мощности БГШ равное нулю. Отключите генератор мультипликативной помехи. Проверьте значения параметров модели: несущая частота $f_0 = 5$; $M = 8$; $\varphi_0 = 0$; $\tau_s = 1$ (параметр «Sample time» блока «Random Integer»).

Зарисуйте осциллограммы в точках схемы. Поясните вид осциллограмм.

2.3. Исследование помехоустойчивости сигнала с АМн на фоне БГШ для кратности модуляции $M = 2$.

2.3.1. Отключите генератор мультипликативной помехи. В блоке «Random Integer» установите параметр «M-ary number» равным 2. Изменяя дисперсию генератора БГШ (параметр «Variance» блока «Gaussian») с неравномерным шагом от 200 до нуля, зафиксируйте значение отношения С/Ш

и количество ошибочных символов на интервале наблюдения. Изобразите график зависимости вероятности ошибки приёма от отношения С/Ш, сделайте выводы.

Для увеличения статистики можно изменять длительность наблюдения сигнала, увеличивая глобальный параметр модели «Simulation stop time» на панели инструментов.

2.3.2. Подключите генератор мультипликативной помехи, дисперсию БГШ сделайте равной нулю. Установите параметр «Stopband edge frequency» блока «cheby2» равным $2\pi \cdot 0.1$.

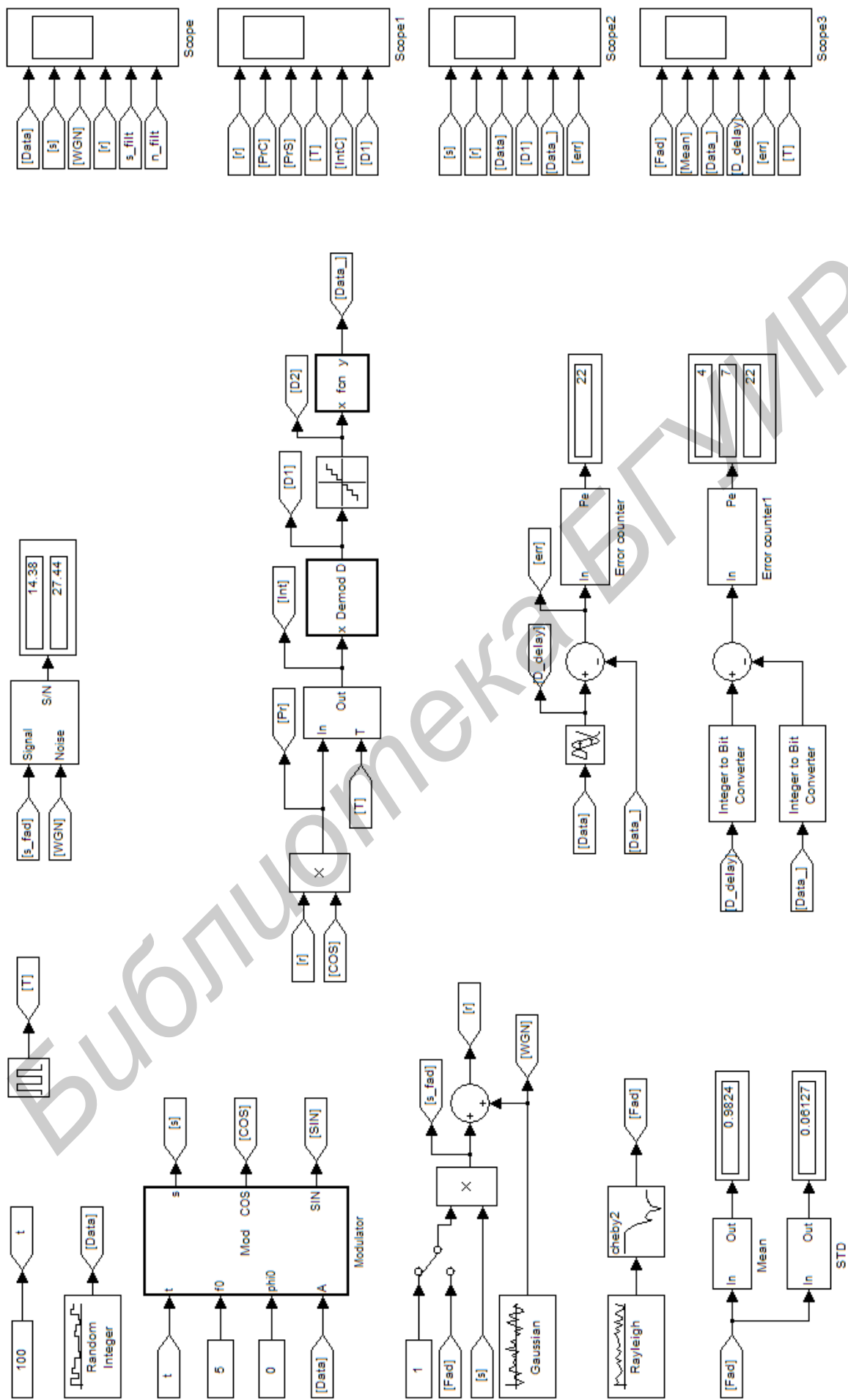


Рис. 2.11

Изменяя параметр «Sigma» блока «Rayleigh» от 0.1 до 40 с неравномерным шагом фиксируйте количество ошибочных символов и СКО флуктуаций амплитуды сигнала. Изобразите график зависимости вероятности ошибки приёма от отношения С/Ш, сделайте выводы.

2.3.3. Установите значение «Sigma» блока «Rayleigh» – 5, сохранив остальные параметры системы неизменными. Изменяя дисперсию БГШ от 0 до 100, постройте кривые помехоустойчивости, сделайте выводы о степени влияния БГШ и мультипликативной помехи на качество приёма сигнала с АМн кратностью 2.

2.3.4. Последовательно устанавливая значения «Stopband edge frequency» блока «cheby2» равными $2\pi \cdot 0.5$ и $2\pi \cdot 1$, исследуйте систему согласно п. 1.3.3. При моделировании фиксируйте среднее значение и СКО мультипликативной помехи.

Как можно оценить результаты помехоустойчивости приёма АМн сигнала на фоне БГШ и/или мультипликативной помехи?

2.4. Исследование помехоустойчивости сигнала с АМн на фоне БГШ для кратности модуляции $M = 4$.

Установив кратность модуляции равной 4 (2 бит/символ), промоделируйте ситуации, указанные в п. 2.3.

Изобразите графики зависимости вероятности ошибки приёма от отношения С/Ш при различных уровнях мультипликативной помехи, сделайте выводы.

Сравните полученные в п. 2.4 результаты с результатами помехоустойчивости в п. 2.3.

Обратите внимание, что второй (младший) бит поражается помехой чаще, нежели первый (старший). Как это можно объяснить?

2.5. Исследование помехоустойчивости сигнала с АМн на фоне БГШ для кратности модуляции $M = 8$.

Установив кратность модуляции равной 8 (3 бит/символ), промоделируйте ситуации, указанные в п. 2.3.

Изобразите графики зависимости вероятности ошибки приёма от отношения С/Ш при различных уровнях мультипликативной помехи, сделайте выводы.

Сравните полученные в п. 2.5 результаты с результатами помехоустойчивости в п. 1.3 и 1.4.

2.6. Исследование помехоустойчивости сигнала с АМн на фоне БГШ для кратности модуляции $M = 16$.

При наличии времени установите кратность модуляции равной 16 (параметр «M-ary number» блока «Random Integer»). Исследуйте помехоустойчивость системы согласно п. 2.3.

3. ФОРМИРОВАНИЕ И ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ С ФАЗОВОЙ МАНИПУЛЯЦИЕЙ

ВВОДНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Численная модель позволяет формировать и осуществлять оптимальную обработку сигнала с фазовой манипуляцией (ФМн):

$$s(t) = A_0 \cos[\omega_0 t + k_\varphi x(t) + \varphi_0], \quad x(t) \equiv x_i \in [0; M - 1], \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad (3.1)$$

где M – количество сигналов в сигнальном пространстве; k_φ – элементарный фазовый дискрет сигнала; φ_0 – начальная фаза опорного колебания (см. рис. 3.1).

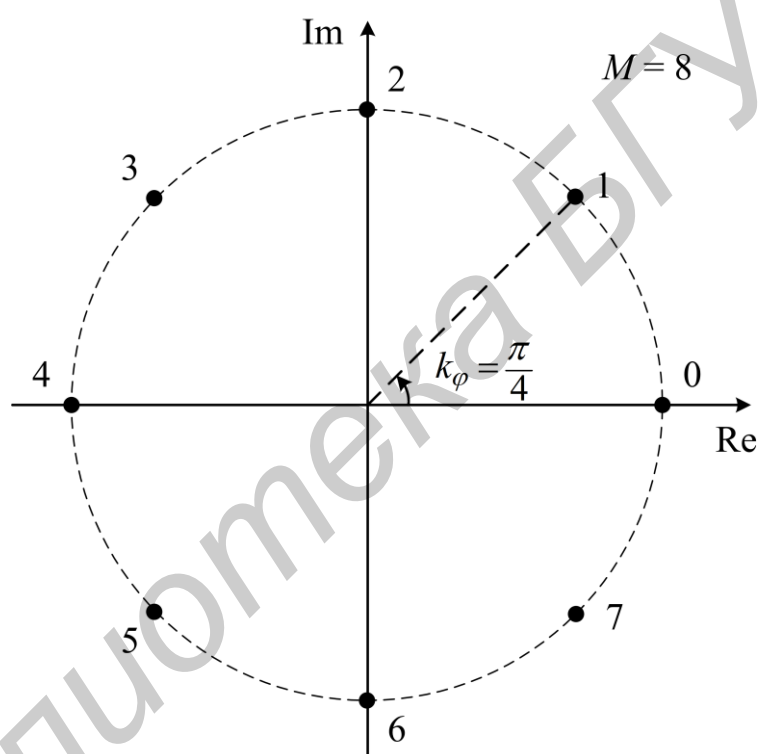


Рис. 3.1

Модель позволяет оценивать помехоустойчивость обработки сигнала при наличии аддитивных и мультипликативных помех в канале связи.

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Модель состоит из следующих крупных структурных элементов.

- 1) Формирователь сигнала (модулятор) изображён на рисунке 3.2

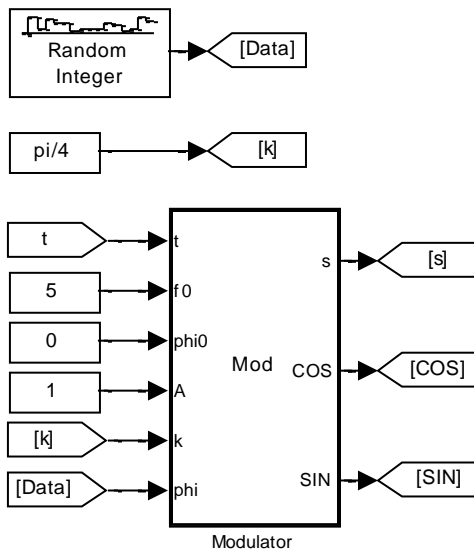


Рис. 3.2

На рисунке 3.2: «t» – время; «f0» – частота несущего колебания; «phi0» – начальная фаза несущего колебания; «A» – амплитуда опорного колебания; «k» – величина фазового дискрета; «Data» – M-уровневый сигнал, представляющий информационный поток.

Сигналы «COS» и «SIN» необходимы для синхронной обработки ФМн сигнала.

2) Формирователь комплекса помех (рис. 3.3)

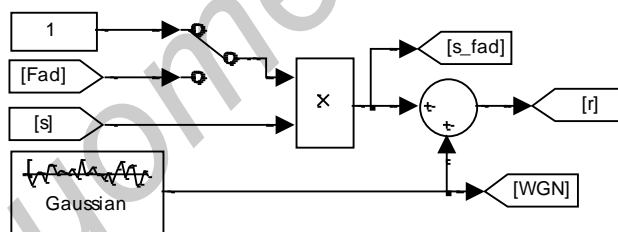


Рис. 3.3

В устройстве осуществляется перемножение сигнала и мультипликативной помехи с последующим подмешиванием аддитивной помехи в виде белого гауссовского шума (БГШ):

$$r(t) = \mu(t)s(t) + n(t), \quad (3.2)$$

где $\mu(t)$ – мультипликативная помеха; $n(t)$ – БГШ.

3) Генератор мультипликативной помехи (рис. 3.4)

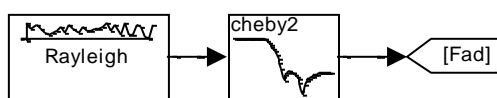


Рис. 3.4

Генератор состоит из источника случайных чисел с распределением Релея и фильтра нижних частот, задающего максимальную частоту амплитудных флуктуаций сигнала.

4) Устройство приёма и обработки сигнала (рис. 3.5)

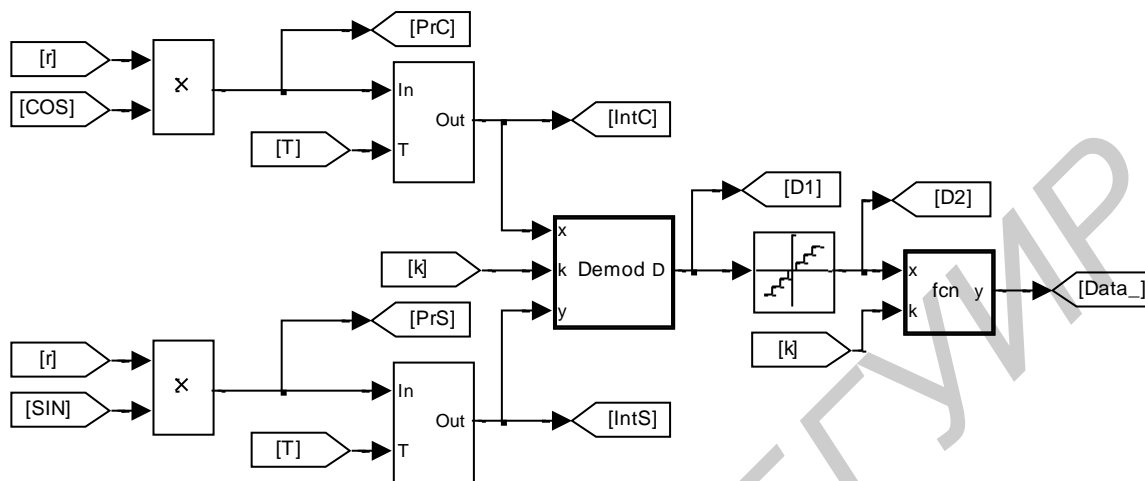


Рис. 3.5

5) Измерительные системы и средства визуализации (рис. 3.6–3.10):

Измеритель отношения сигнал-шум (С/Ш) в канале связи: E_s/N_0 , где E_s – средняя энергия одного символа; N_0 – односторонняя спектральная плотность мощности БГШ (рис. 3.6).

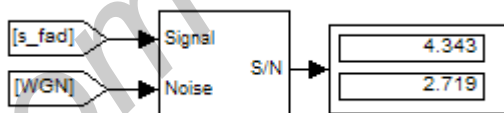


Рис. 3.6

Отношение С/Ш измеряется в полосе сигнала $\Delta f = f_0 - 1/\tau_s; f_0 + 1/\tau_s$, где τ_s – длительность элемента информационного сигнала. Верхнее значение на устройстве индикации в дБ, нижнее – в размах.

Измеритель математического ожидания и среднеквадратического отклонения (СКО) мультипликативной помехи (рис. 3.7)

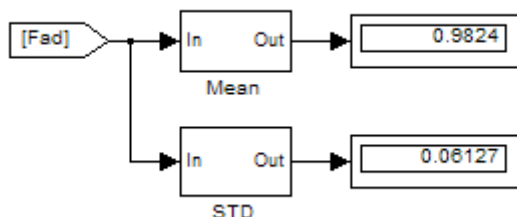


Рис. 3.7

Счётчик количества ошибок приёма символов на интервале наблюдения (рис. 3.8)

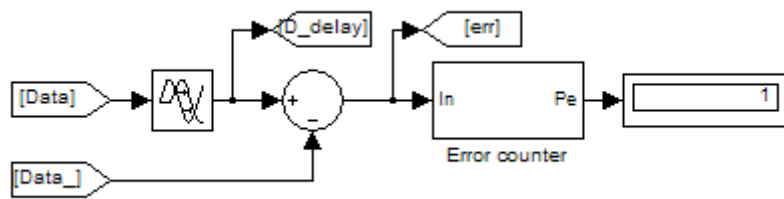


Рис. 3.8

Счётчик количества ошибочных бит информации на интервале наблюдения (рис. 3.9)

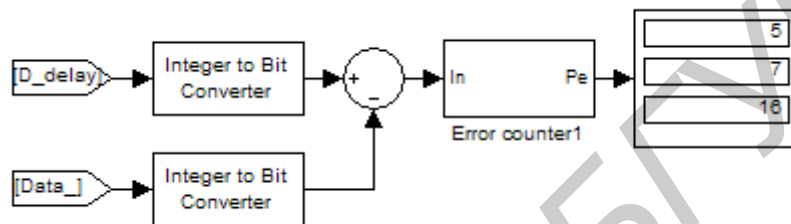


Рис. 3.9

Осциллографы, позволяющие наблюдать реализации сигнала после каждого функционального элемента модели (рис. 3.10).

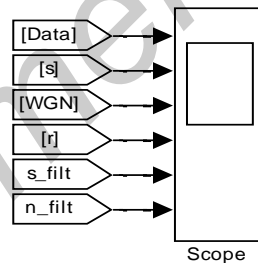


Рис. 3.10

Общий вид модели приведён на рисунке 3.11.

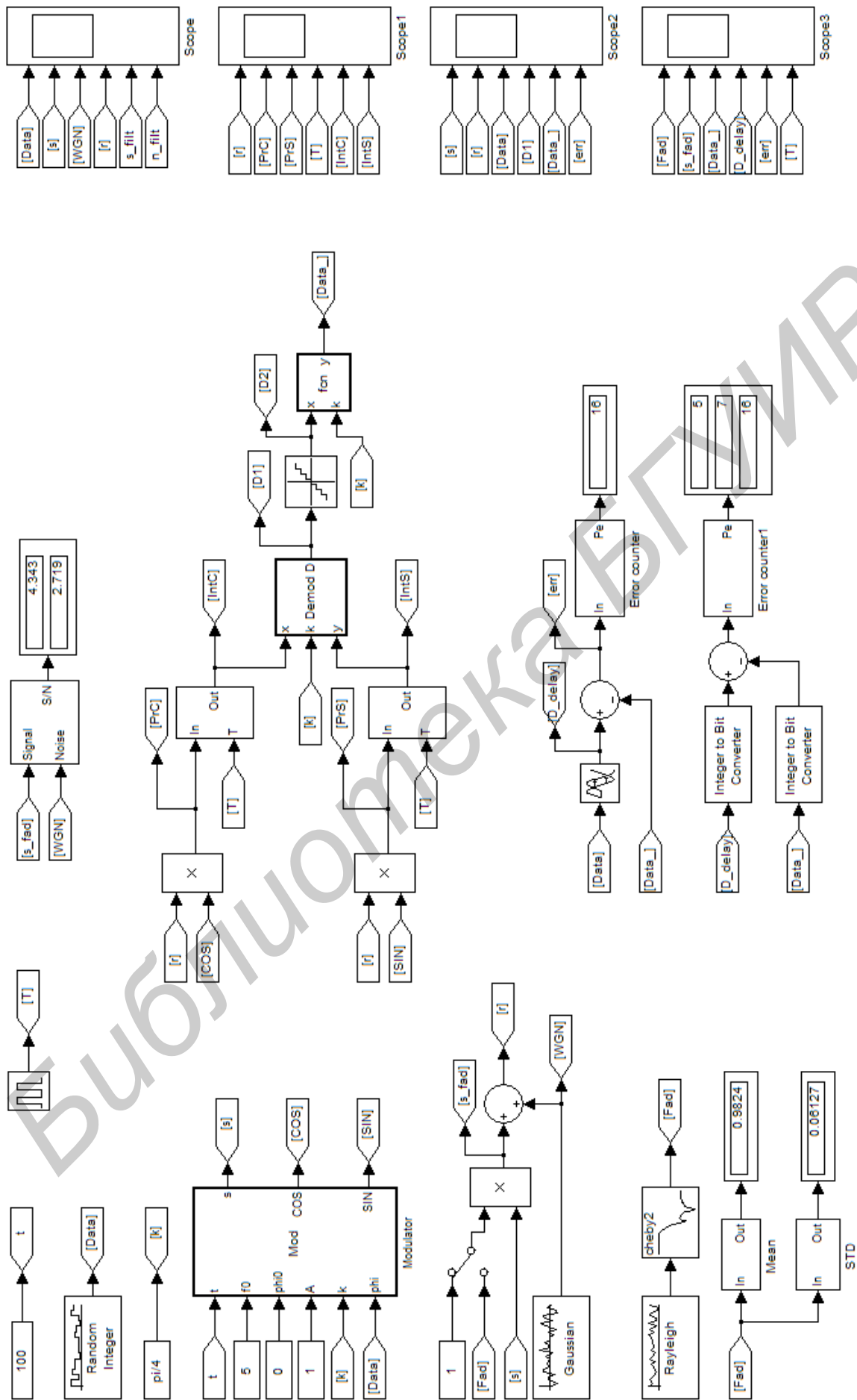


Рис. 3.11

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

3.1. Составление структурной и функциональной схем численной модели

Внимательно изучите каждый элемент модели. Посмотрите, какие параметры задают функциональность блоков, поясните их физический смысл. Как осуществляется фазовая манипуляция? Что в модели формирует сообщение? Как осуществляется демодуляция сигнала? Укажите назначение элементов, составьте структурную и функциональную схемы передающего устройства и приёмного устройства

3.2. Осциллограммы в точках схемы

Установите значение мощности БГШ равное нулю. Отключите генератор мультипликативной помехи. Проверьте значения параметров модели: несущая частота $f_0 = 5$; $M = 8$; $\varphi_0 = 0$; $\tau_s = 1$ (параметр «Sample time» блока «Random Integer»).

Зарисуйте осциллограммы в точках схемы. Поясните вид осциллограмм.

3.3. Исследование помехоустойчивости сигнала с ФМн на фоне БГШ для кратности модуляции $M = 2$.

3.3.1. Отключите генератор мультипликативной помехи. В блоке «Random Integer» установите параметр «M-ary number» равным 2. Изменяя дисперсию генератора БГШ (параметр «Variance» блока «Gaussian») с неравномерным шагом от 100 до нуля, зафиксируйте значение отношения С/Ш и количество ошибочных символов на интервале наблюдения. Изобразите график зависимости вероятности ошибки приёма от отношения С/Ш, сделайте выводы.

Для увеличения статистики можно изменять длительность наблюдения сигнала, увеличивая глобальный параметр модели «Simulation stop time» на панели инструментов.

3.3.2. Подключите генератор мультипликативной помехи, дисперсию БГШ сделайте равной нулю. Установите параметр «Stopband edge frequency» блока «cheby2» равным $2 \cdot \pi \cdot 0.1$.

Изменяя параметр «Sigma» блока «Rayleigh» от 0.1 до 40 с неравномерным шагом фиксируйте количество ошибочных символов и СКО флуктуаций амплитуды сигнала. Изобразите график зависимости вероятности ошибки приёма от отношения С/Ш, сделайте выводы.

3.3.3. Установите значение «Sigma» блока «Rayleigh» – 5, сохранив остальные параметры системы неизменными. Изменяя дисперсию БГШ от 0 до 100, постройте кривые помехоустойчивости, сделайте выводы о степени влияния БГШ и мультипликативной помехи на качество приёма сигнала с ФМн кратностью 2.

3.3.4. Последовательно устанавливая значения «Stopband edge frequency» блока «cheby2» равными $2 \cdot \pi \cdot 0.5$ и $2 \cdot \pi \cdot 1$, исследуйте систему согласно

п. 3.3.3. При моделировании фиксируйте среднее значение и СКО мультипликативной помехи.

Как можно оценить результаты помехоустойчивости приёма ФМн сигнала на фоне БГШ и/или мультипликативной помехи?

3.4. Исследование помехоустойчивости сигнала с ФМн на фоне БГШ для кратности модуляции $M = 4$.

Установив кратность модуляции равной 4 (2 бит/символ), промоделируйте ситуации, указанные в п. 1.3. Для кратности модуляции $M \geq 4$ в рамках исследования помехоустойчивости необходимо также оценивать **вероятность ошибки на бит**, которая определяется как сумма всех показаний на выходе блока «Error counter 1».

Изобразите графики зависимости вероятности ошибки приёма от отношения С/Ш при различных уровнях мультипликативной помехи, сделайте выводы.

Сравните полученные в п. 3.4 результаты с результатами помехоустойчивости в п. 3.3.

3.5. Исследование помехоустойчивости сигнала с ФМн на фоне БГШ для кратности модуляции $M = 8$.

Установив кратность модуляции равной 8 (3 бит/символ), промоделируйте ситуации, указанные в п. 3.3.

Изобразите графики зависимости вероятности ошибки приёма от отношения С/Ш при различных уровнях мультипликативной помехи, сделайте выводы.

Обратите внимание, что третий (младший) бит поражается помехой чаще, нежели первый (старший). Как это можно объяснить?

Сравните полученные в п. 3.5 результаты с результатами помехоустойчивости в п. 3.3 и 3.4.

3.6. Исследование помехоустойчивости сигнала с ФМн на фоне БГШ для кратности модуляции $M = 16$.

При наличии времени установите кратность модуляции равной 16 (параметр «M-ary number» блока «Random Integer»). Исследуйте помехоустойчивость системы согласно п. 3.3.

Сравните помехоустойчивость приёма сигнала с ФМн и АМн.

4. ФОРМИРОВАНИЕ И ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ С ЧАСТОТНОЙ МАНИПУЛЯЦИЕЙ

ВВОДНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Численная модель позволяет формировать и осуществлять оптимальную обработку сигнала с фазовой манипуляцией (ЧМн):

$$s(t) = A_0 \cos \left[\omega_0 t + k_\omega \int_0^t x(\tau) d\tau + \varphi_0 \right], \quad x(t) \equiv x_i \in [0; M - 1], \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad (4.1)$$

где M – количество сигналов в сигнальном пространстве; k_ω – элементарный фазовый дискрет сигнала (см. рис. 4.1, вверху); φ_0 – начальная фаза опорного колебания; $x(t)$ – информационный процесс. На рисунке 4.1 внизу приведена осциллограмма сигнала $s(t)$.

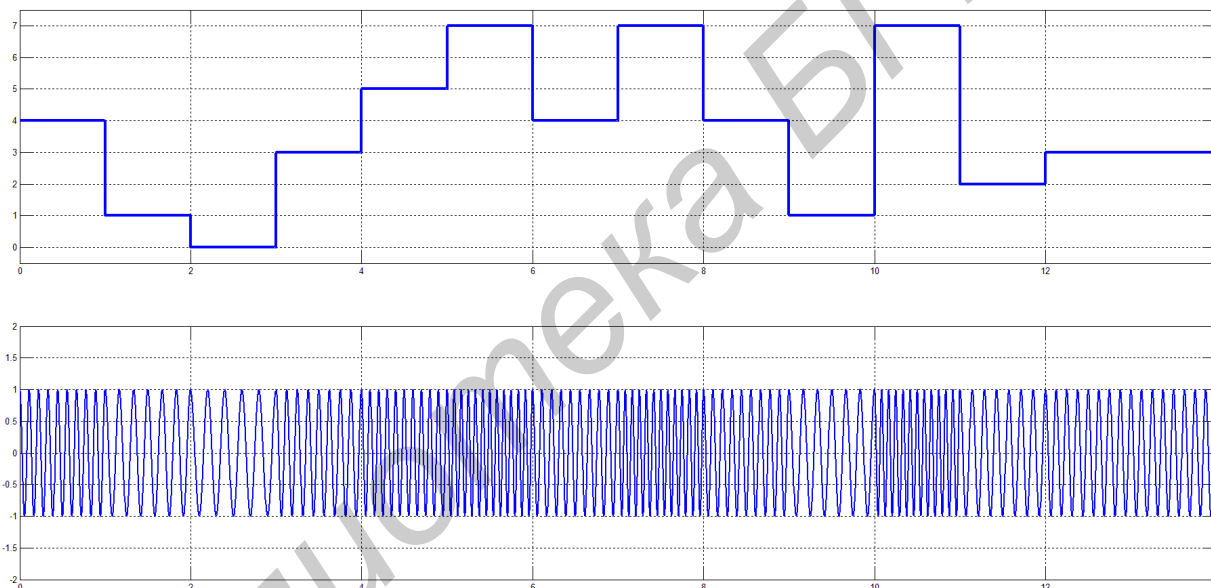


Рис. 4.1

Модель позволяет оценивать помехоустойчивость обработки сигнала при наличии аддитивных и мультипликативных помех в канале связи.

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Модель состоит из следующих крупных структурных элементов.

- 1) Формирователь сигнала (модулятор) изображён на рис. 4.2.

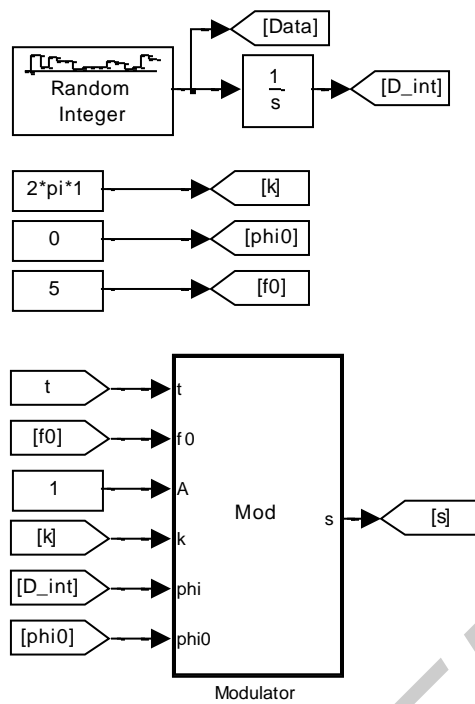


Рис. 4.2

На рисунке 4.2: «t» – время; «f0» – частота несущего колебания; «phi0» – начальная фаза несущего колебания; «A» – амплитуда опорного колебания; «k» – величина частотного дискрета; «Data» – M-уровневый сигнал, представляющий информационный поток; «D_int» – результат интегрирования информационного потока.

2) Формирователь комплекса помех (рис. 4.3)

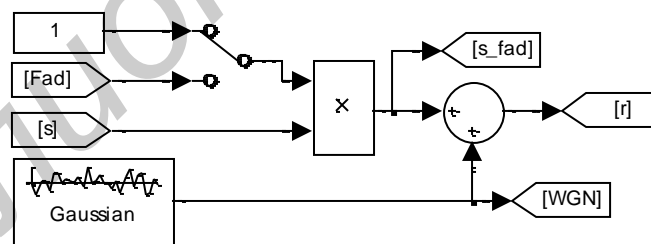


Рис. 4.3

В устройстве осуществляется перемножение сигнала и мультипликативной помехи с последующим подмешиванием аддитивной помехи в виде белого гауссовского шума (БГШ):

$$r(t) = \mu(t)s(t) + n(t), \quad (4.2)$$

где $\mu(t)$ – мультипликативная помеха; $n(t)$ – БГШ.

3) Генератор мультипликативной помехи (рис. 4.4)

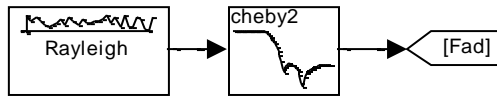


Рис. 4.4

Генератор состоит из источника случайных чисел с распределением Релея и фильтра нижних частот, задающего максимальную частоту амплитудных флуктуаций сигнала.

4) Устройство приёма и обработки сигнала (рис. 4.5)

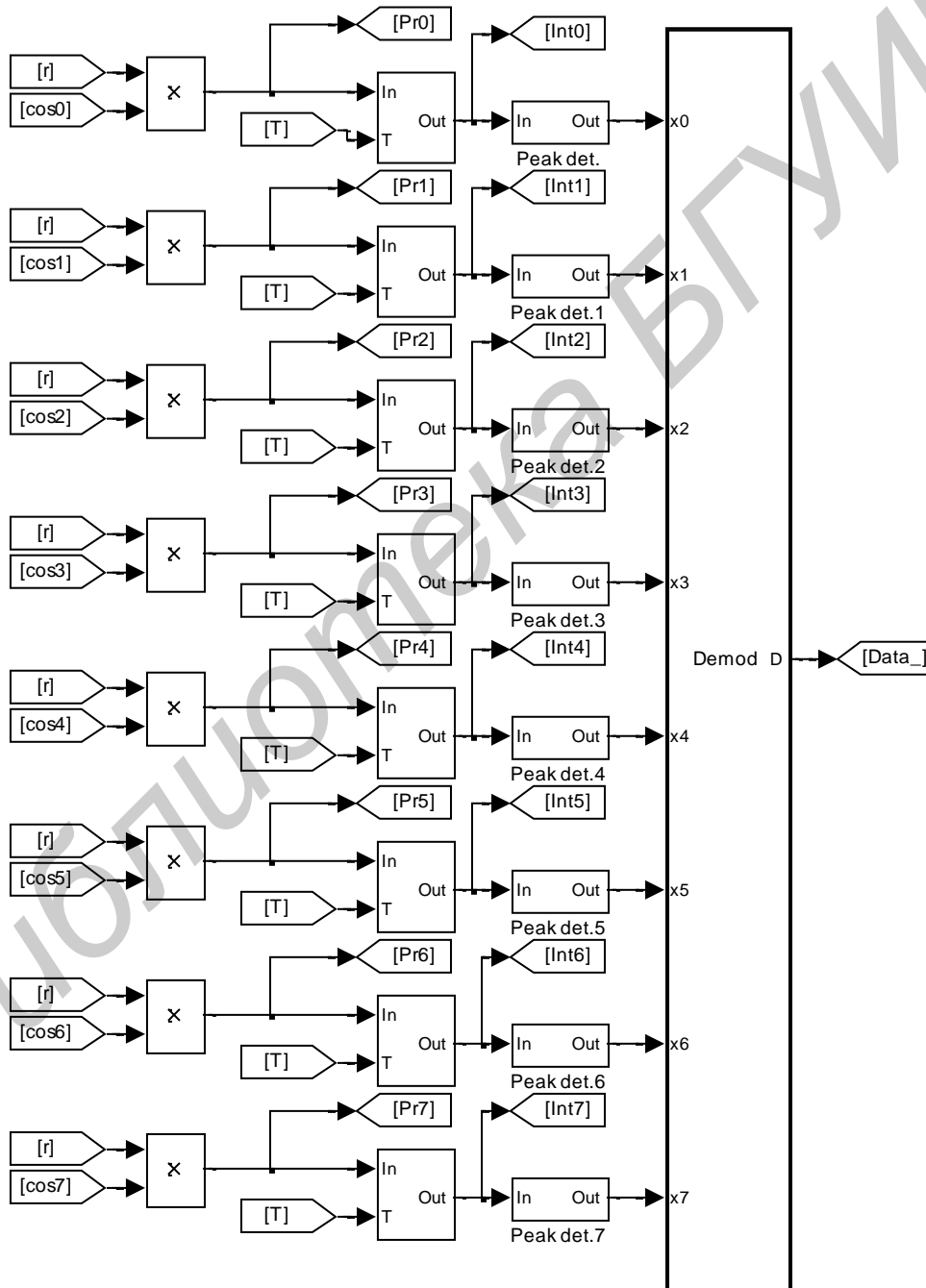


Рис. 4.5

5) Синтезатор сетки частот

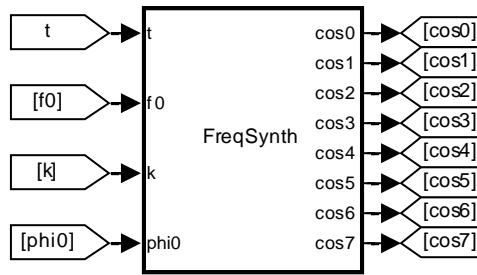


Рис. 4.6

б) Измерительные системы и средства визуализации (рис. 4.7–4.11)

Измеритель отношения сигнал-шум (С/Ш) в канале связи: E_s/N_0 , где E_s – средняя энергия одного символа; N_0 – односторонняя спектральная плотность мощности БГШ (рис. 4.7).

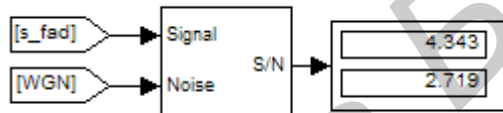


Рис. 4.7

Отношение С/Ш измеряется в полосе сигнала $\Delta f = f_0 - 1/\tau_s; f_0 + 1/\tau_s$, где τ_s – длительность элемента информационного сигнала. Верхнее значение на устройстве индикации в дБ, нижнее – в размах.

Измеритель математического ожидания и среднеквадратического отклонения (СКО) мультипликативной помехи (рис. 4.8)

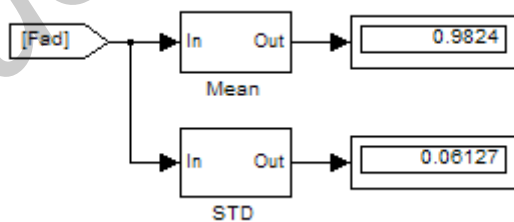


Рис. 4.8

Счётчик количества ошибок приёма символов на интервале наблюдения (рис. 4.9)

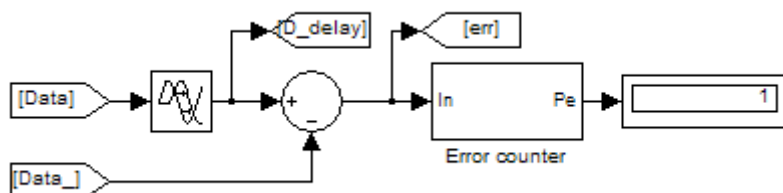


Рис. 4.9

Счётчик количества ошибочных бит информации на интервале наблюдения (рис. 4.10)

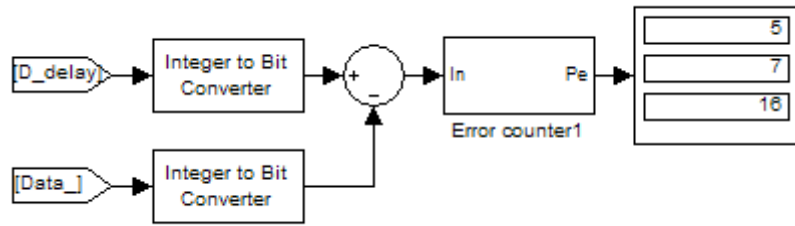


Рис. 4.10

Осциллографы, позволяющие наблюдать реализации сигнала после каждого функционального элемента модели (рис. 4.11).

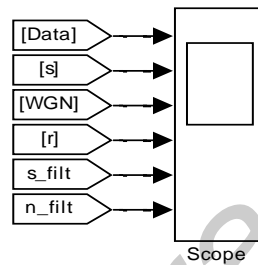


Рис. 4.11

Общий вид модели приведён на рисунке 4.12.

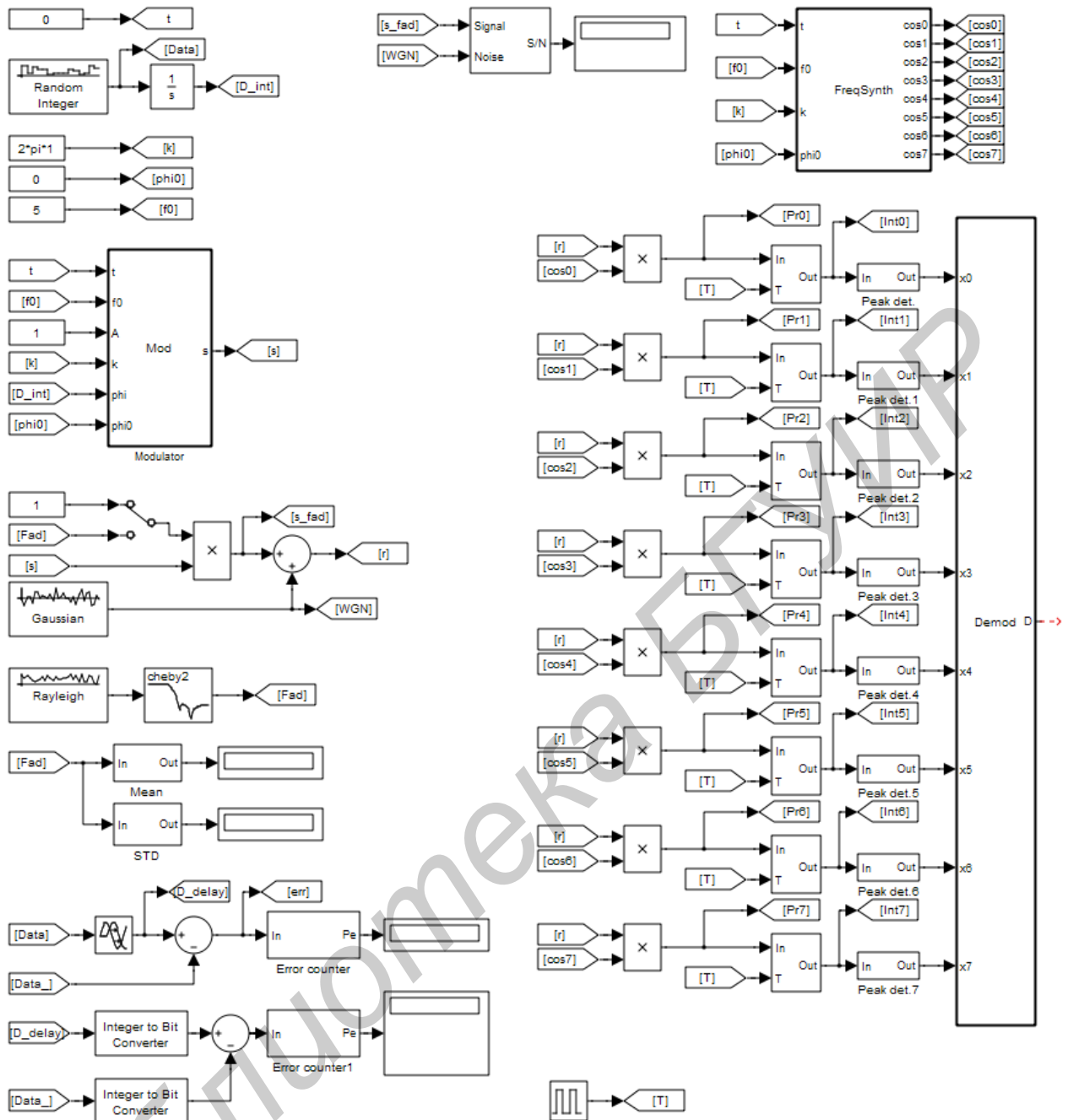


Рис. 4.12

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

4.1. Составление структурной и функциональной схем численной модели

Внимательно изучите каждый элемент модели. Посмотрите, какие параметры задают функциональность блоков, поясните их физический смысл. Как осуществляется частотная манипуляция? Что в модели формирует сообщение? Как осуществляется демодуляция сигнала? Для чего служат пиковые детекторы сигнала в каждом из подканалов?

Укажите назначение элементов, составьте структурную и функциональную схемы передающего устройства и приёмного устройства.

Почему для оптимальной демодуляции сигнала с ЧМн нельзя использовать одноканальную схему?

4.2. Осциллограммы в точках схемы

Установите значение мощности БГШ равное нулю. Отключите генератор мультипликативной помехи. Проверьте значения параметров модели: несущая частота $f_0 = 5$; $M = 8$; $\varphi_0 = 0$; $\tau_s = 1$ (параметр «Sample time» блока «Random Integer»).

Зарисуйте осциллограммы в точках схемы. Поясните вид осциллограмм.

4.3. Исследование помехоустойчивости сигнала с ЧМн на фоне БГШ.

4.3.1. Отключите генератор мультипликативной помехи. В блоке «Random Integer» установите параметр «M-ary number» равным 8. Изменяя дисперсию генератора БГШ (параметр «Variance» блока «Gaussian») с неравномерным шагом от 200 до нуля, зафиксируйте значение отношения С/Ш и **количество ошибочных символов** на интервале наблюдения. Изобразите график зависимости вероятности ошибки приёма от отношения С/Ш, сделайте выводы. Вероятность ошибки на символ определяется отношением количества ошибочно принятых символов к общему числу символов на интервале наблюдения.

В рамках исследования помехоустойчивости необходимо также оценивать **вероятность ошибки на бит**. Количество ошибочных бит определяется как сумма всех показаний на выходе блока «Error counter 1».

Для увеличения статистики можно изменять длительность наблюдения сигнала, увеличивая глобальный параметр модели «Simulation stop time» на панели инструментов.

4.3.2. Подключите генератор мультипликативной помехи, дисперсию БГШ сделайте равной нулю. Установите параметр «Stopband edge frequency» блока «cheby2» равным $2\pi \cdot 0.1$.

Изменяя параметр «Sigma» блока «Rayleigh» от 0.1 до 40 с неравномерным шагом, фиксируйте количество ошибочных символов и СКО флуктуаций амплитуды сигнала. Изобразите график зависимости вероятности ошибки приёма от отношения С/Ш, сделайте выводы.

4.3.3. Установите значение «Sigma» блока «Rayleigh» – 5, сохранив остальные параметры системы неизменными. Изменяя дисперсию БГШ от 0 до 100, постройте кривые помехоустойчивости, сделайте выводы о степени влияния БГШ и мультипликативной помехи на качество приёма сигнала с ЧМн.

4.3.4. Последовательно устанавливая значения «Stopband edge frequency» блока «cheby2» равными $2\pi \cdot 0.5$ и $2\pi \cdot 1$, исследуйте систему согласно п. 4.3.3. При моделировании фиксируйте среднее значение и СКО мультипликативной помехи.

Как можно оценить результаты помехоустойчивости приёма ЧМн сигнала на фоне БГШ и/или мультипликативной помехи?

Объясните, почему для ЧМн сигнала количество ошибочных бит всех трёх разрядов всегда приблизительно одинаково.

4.4. Исследование помехоустойчивости сигнала с ЧМн на фоне БГШ с сильными замираниями.

Установите параметр «Sigma» блока «Rayleigh» равным 200. Установите на входе устройства оптимальной обработки жёсткий ограничитель в виде безынерционного нелинейного преобразователя с амплитудной характеристикой $\text{sign}(x)$. Если необходимо, после жёсткого ограничителя можно подключить полосовой фильтр для подавления паразитных компонент. Однако в этом случае может потребоваться подстройка начальной фазы колебаний синтезатора частот.

Исследуйте помехоустойчивость системы согласно п. 4.3. Сравните помехоустойчивость приёма сигнала с ЧМн и ФМн.

4.4. Исследование помехоустойчивости сигнала с 4-хпозиционной ЧМн.

При наличии времени установите параметр «M-ary number» блока «Random Integer» равным 4 и исследуйте систему согласно п. 4.3.

5. СВЁРТОЧНОЕ КОДИРОВАНИЕ СИГНАЛОВ

ВВОДНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Свёрточное кодирование – метод непрерывного кодирования двоичного потока данных, при котором каждому входному двоичному символу соответствует несколько символов на выходе кодера. Свёрточное кодирование – это один из методов помехоустойчивого канального кодирования, основное назначение которого является исправление ошибок небольшой кратности.

Свёрточный кодер добавляет в последовательность избыточную информацию. Например, если каждому входному биту соответствует два выходных, то говорят о свёрточном кодировании со скоростью $R = 1/2$. В случае, когда двум битам входной последовательности соответствует три бита выходной, то скорость свёрточного кодирования будет составлять уже $R = 2/3$. Параметр R показывает отношение информационной скорости к технической. Чем ближе этот параметр к нулю, тем больше помехоустойчивость кода, но менее эффективно используется канал связи.

Любой свёрточный кодер строится на основе регистров сдвига. Количество запоминающих ячеек определяет количество возможных состояний кодера. Если, к примеру, в свёрточном кодере используется шесть запоминающих ячеек, то в кодере хранится информация о шести предыдущих состояниях сигнала, а с учётом входного бита получим, что в таком кодере используется семь бит входной последовательности. Такой свёрточный кодер называется кодером на семь состояний.

Таким образом, выходной бинарный поток, формируемый в свёрточном кодере, определяется значением входного бита и битами, хранимыми в запоминающих ячейках, т. е. значение каждого формируемого выходного бита зависит не только от входящего информационного бита, но и от нескольких предыдущих битов. Свёрточный кодер – устройство с памятью. Главной характеристикой свёрточных кодеров является помехоустойчивость формируемой ими последовательности.

ОПИСАНИЕ МОДЕЛЕЙ

В работе моделируется помехоустойчивость двух схем свёрточных кодеров:

- кодер, формирующий последовательность сцепленных свёрточных кодов;
- кодер Рида – Соломона со стиранием.

Особенность второй модели состоит в том, что в ней реализована система свёрточного кодирования с 64-позиционной квадратурной амплитудной манипуляцией (КАМ).

Общий вид модели, реализующей метод повышения помехоустойчивости системы на основе сцепленных кодов, показан на рисунке.

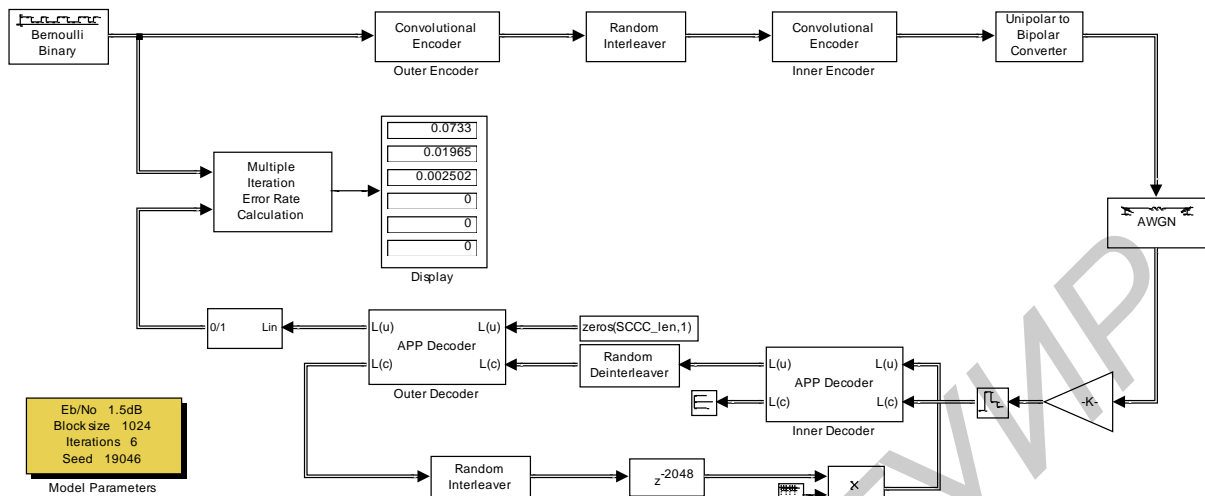


Рис. 5.1

Модель содержит следующие структурные элементы:

- 1) Bernoulli Binary – генератор информационной последовательности, формирующий блоки длиной 2^N бита;
- 2) Convolutional Encoder – свёрточный кодер;
- 3) Random Interleaver – перемежитель данных на длине 2^{N+1} ;
- 4) Unipolar to Bipolar Converter – преобразователь двоичной последовательности в последовательность значений ± 1 ;
- 5) AWGN – блок, моделирующий канал с аддитивным белым гауссовским шумом (АБГШ);
- 6) Random Deinterleaver – обратный перемежитель сигнала;
- 7) APP decoder – декодер информационной последовательности на основе максимума апостериорной вероятности символа;
- 8) Multiple Iteration Error Rate Calculation – итеративный счётчик количества ошибок. По умолчанию количество итераций – 6.

Структура второй модели приведена на рисунке 5.2.

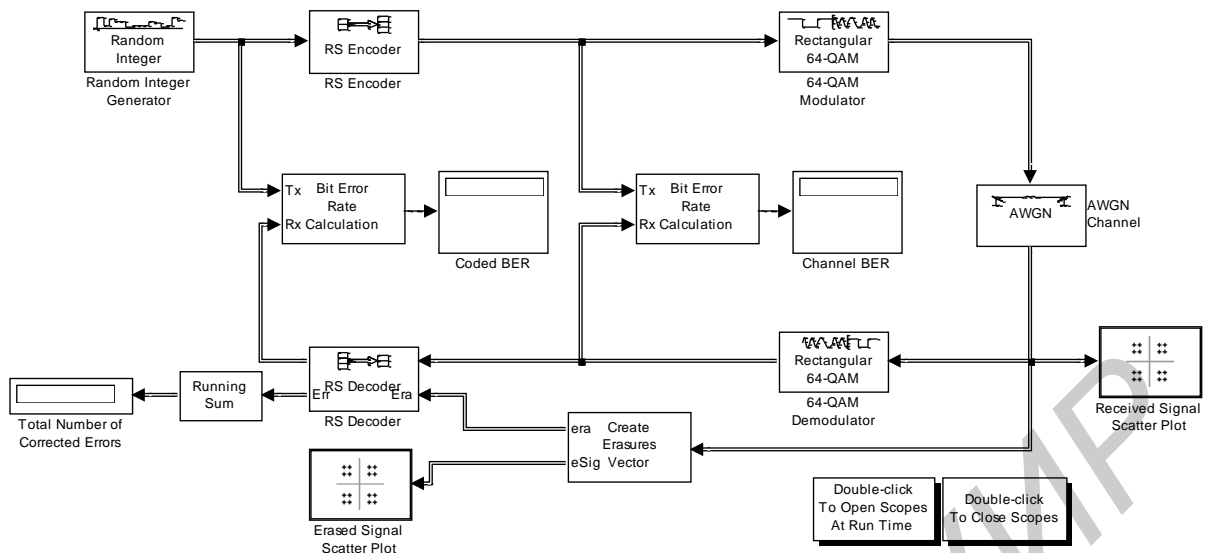


Рис. 5.2

Модель кодера Рида – Соломона со стиранием содержит следующие элементы:

- 1) Random Integer – генератор последовательности случайных чисел;
- 2) RS Encoder – кодер Рида – Соломона;
- 3) 64-QAM (De)Modulator – (де)модулятор КАМ-сигнала;
- 4) Running Sum – счётчик исправленных ошибок;
- 5) Channel BER (Coded BER) – индикаторы вероятности ошибочного приёма двоичных символов.

На индикаторах 3 табло: первое (верхнее) показывает вероятность ошибки на символ; второе – количество ошибок; третье – суммарное количество полученных символов.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Сцепленный свёрточный кодер

5.1. Загрузите файл MODEL_5a. Внимательно изучите принцип работы модели, поясните назначение элементов. Установите в «Model Parameters» длину блока равной 2, количество итераций – 2. Изменяя значение E_b/N_0 от 200 до 0 с неравномерным шагом, фиксируйте вероятность ошибки на символ для первой итерации (верхнее показание индикатора) и для второй итерации.

Для увеличения статистики можно увеличить глобальный параметр модели «Simulation stop time» до нескольких сот тысяч. Постройте обе зависимости от отношения сигнал/шум на одном графике.

Изменяя количество итераций декодера от 3 до 6 постройте аналогичные семейства кривых помехоустойчивости.

5.2. Установите в «Model Parameters» длину блока равной 8 и повторите п. 5.1. Постройте кривые помехоустойчивости, сравните с полученными ранее. Укажите что изменилось и поясните причины изменений. Сравните результаты с теоретическими.

5.3. Установите в «Model Parameters» длину блока равной 8 и повторите п. 5.1. Диапазон изменений E_b/N_0 для исследуемой длины блока можно изменять от 20 до 0,1. Постройте кривые помехоустойчивости, сделайте выводы.

Кодер Рида – Соломона

5.4. Загрузите файл MODEL_5b. Внимательно изучите принцип работы модели, поясните назначение элементов.

Через меню «File – Model Properties – Callbacks» в секциях PreLoadFcn и InitFcn установите следующие параметры модели в:

```
RS_TsUncoded = 1; % Sample time
RS_n = 63; % Codeword length
RS_k = 53; % Message length
RS_MQAM = 64; % QAM order
RS_numBitsPerSymbol = log2(RS_MQAM); % 6 bits per symbol
RS_sigPower = 42; % Assume points at +/-1, +/-3, +/-5, +/-7, +/-9
RS_numErasures = 6;
RS_EbNoUncoded = 15; % In dB
RS_EbNoCoded = RS_EbNoUncoded + 10*log10(RS_k/RS_n); % coded Eb/No, in dB
RS_TsymCoded = RS_TsUncoded * (RS_k/RS_n); % Symbol time of coded signal
```

Изменяя количество стираемых значений от 1 до 6, зафиксируйте вероятность ошибки для различных значений RS_EbNoUncoded, количество исправленных ошибок и построьте необходимые зависимости от отношения сигнал/шум.

Сравните кривые помехоустойчивости для сигнала со стиранием и без него.

6. АЛГОРИТМ ВИТЕРБИ ДЛЯ ДЕКОДИРОВАНИЯ СИГНАЛОВ

ВВОДНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Задачу декодирования свёрточного кода можно рассматривать как задачу нахождения оптимального пути по решётчатой диаграмме с помощью некоторых правил декодирования. Идеальным был бы выбор, минимизирующий число ошибок при сравнении входной последовательности кодера с выходной последовательностью декодера. Аппаратная реализация такого декодера затруднена. Как и в случае блоковых кодов, практически более целесообразным является минимизация вероятности ошибки последовательности. Такой подход не гарантирует минимизации вероятности ошибочной обработки символа, тем не менее, можно утверждать, что для всех кодов малая вероятность ошибки последовательности приводит к малой вероятности ошибки символа.

Важное значение решётчатого представления состоит в том, что с ростом числа входных символов число вершин в решётке не растёт, а остаётся равным $2^k - 1$, где k – длина кодового ограничения (число ячеек в регистре сдвига, необходимом для кодирования). Это обусловлено тем, что избыточные части кодового дерева отождествляются. Следствием такого отождествления является то, что если в некоторой точке был выбран неверный путь, то позднее он может слиться с верным путем и для хороших кодов такое событие вероятно.

Поскольку с ростом длины последовательности число путей растёт экспоненциально, то на первый взгляд задача фактического построения оценки последовательности по максимуму правдоподобия для свёрточного кода кажется весьма сложной. Метод построения такой оценки можно найти, пытаясь непосредственно вычислить метрику для каждого пути на решётке. Вначале число путей действительно растёт экспоненциально с ростом длины последовательности. Однако вскоре появляется возможность исключить из рассмотрения такое число путей в каждой вершине, которое в точности уравнивает число вновь порождённых путей. Таким образом, оказывается возможным иметь сравнительно небольшой список путей, который всегда будет содержать наиболее правдоподобный путь. Эта простая итеративная процедура называется алгоритмом Витерби.

В алгоритме свёрточного декодирования, разработанном Э. Витерби, реализуется декодирование, основанное на принципе максимального правдоподобия. В нём уменьшается вычислительная нагрузка за счёт использования сведений о структуре конкретной решётки кода. Сложность декодера Витерби не зависит от длины кодовых слов. Алгоритм включает в себя вычисление меры подобия (или расстояния) между сигналом, полученным в некоторый момент времени, и всеми путями решётки, входящими в каждое состояние. В алгоритме Витерби не рассматриваются те пути решётки, которые, согласно принципу максимального правдоподобия, заведомо не могут

представлять решение. Если в одно и то же состояние входят два пути, выбирается тот, который имеет лучшую метрику. Отбор оптимальных путей выполняется для каждого состояния. Таким образом, декодер углубляется в решётку, принимая решения путём исключения менее вероятных путей. Предварительный отказ от маловероятных путей упрощает процесс декодирования.

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

В работе моделируется функционирование двух систем передачи информации, в которых используется свёрточное кодирование входной информационной последовательности и декодирование на основе максимального правдоподобия согласно алгоритму Витерби.

Первая модель – ознакомительная. На осциллограммах можно увидеть функциональные преобразования входного потока данных. Также, изменяя решётку кода, возможно оценивание вероятности ошибки декодирования. Функциональная схема кодера представлена на рисунке 6.1.

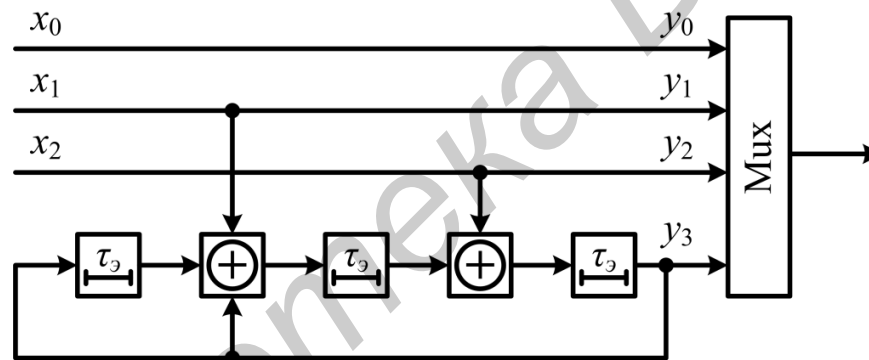


Рис. 6.1

Общий вид модели представлен на рисунке 6.2.

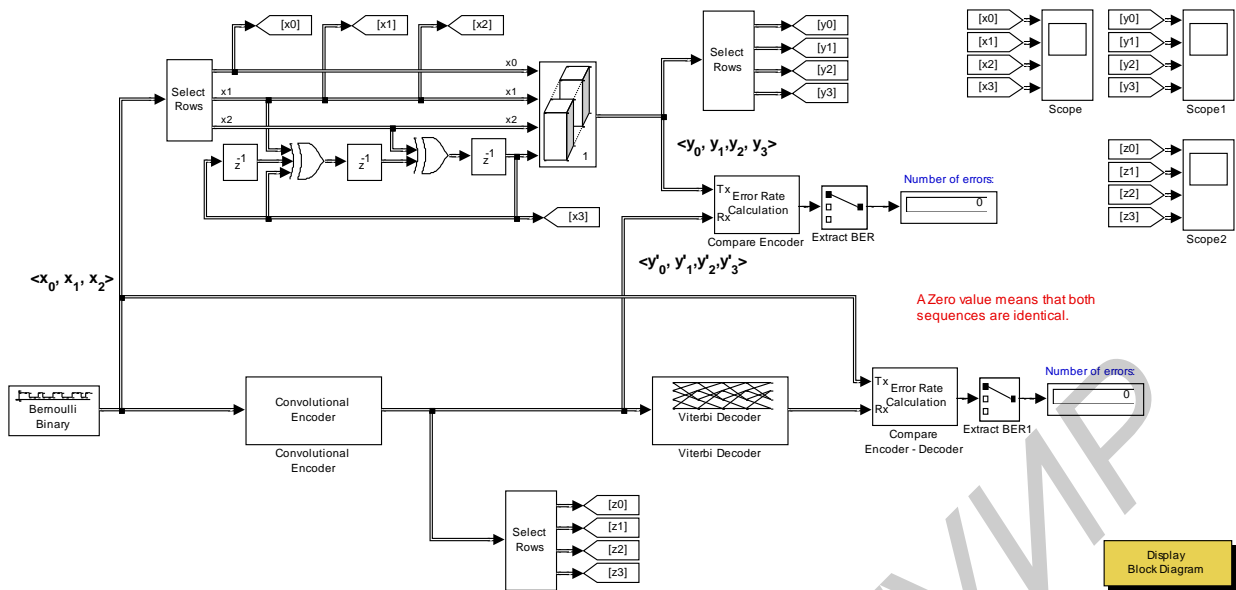


Рис. 6.2

Вторая модель представляет собой систему передачи информации фазоманипулированными сигналами. Декодирование двоичного потока осуществляется согласно алгоритму Витерби. Вид модели представлен на рисунке 6,3.

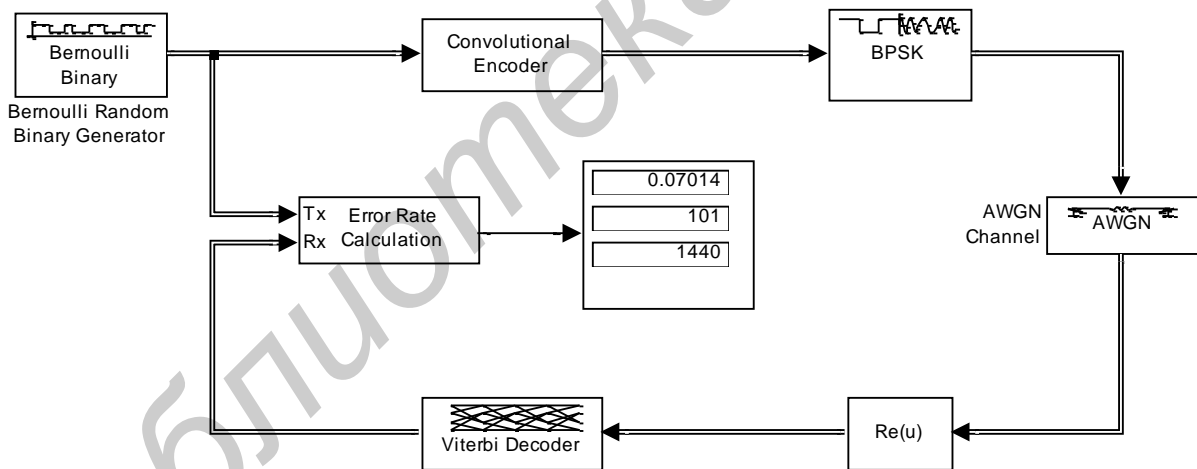


Рис. 6.3

В блоке BPSK осуществляется двоичная фазовая манипуляция гармонического колебания. После канала с аддитивным БГШ сигнал поступает на декодер Витерби, после чего происходит подсчёт количества ошибок и вычисление вероятности появления ошибки на символ.

Свёрточный кодер использует функцию `poly2trellis`, аргументами которой являются два значения. Первый аргумент – это число k , определяющее задержку входного потока. Второй аргумент функции `poly2trellis` – это матрица размером $[k \times n]$, определяющая n выходных сигналов для k входных.

ПОРЯДОК ВЫПЛНЕНИЯ РАБОТЫ

6.1. Загрузите файл MODEL_ба. Установите следующие параметры модели:

```
myTrellis.numInputSymbols = 8;  
myTrellis.numOutputSymbols = 16;  
myTrellis.numStates = 8;  
myTrellis.nextStates = [0 1 2 3 0 1 2 3;  
                        6 7 4 5 6 7 4 5;  
                        1 0 3 2 1 0 3 2;  
                        7 6 5 4 7 6 5 4;  
                        2 3 0 1 2 3 0 1;  
                        4 5 6 7 4 5 6 7;  
                        3 2 1 0 3 2 1 0;  
                        5 4 7 6 5 4 7 6];  
myTrellis.outputs = [0 2 4 6 10 12 14 16;  
                    1 3 5 7 11 13 15 17;  
                    0 2 4 6 10 12 14 16;  
                    1 3 5 7 11 13 15 17;  
                    0 2 4 6 10 12 14 16;  
                    1 3 5 7 11 13 15 17;  
                    0 2 4 6 10 12 14 16;  
                    1 3 5 7 11 13 15 17];
```

Установив глобальный параметр «Simulation stop time» равным 10, зарисуйте осциллограммы в точках и поясните формирование вектора y . Определите скорость кода.

6.2. Загрузите файл MODEL_бв. Определите функциональную схему кодера. Укажите какой сигнал используется для передачи информации.

6.3. Задайте параметр «Input signal power» блока «AWGN channel» равным 0.5. Изменяя с неравномерным шагом параметр « E_s/N_0 » от 10 до 0.2, фиксируйте количество ошибочно принятых символов, общее количество принятых символов и вероятность ошибки.

Постройте кривую помехоустойчивости и сравните с теоретической.

6.4. Последовательно задайте параметр «Input signal power» блока «AWGN channel» равным 1 и 4. По аналогии с п. 6.3 построьте семейство кривых помехоустойчивости. Зарисуйте сигнальное созвездие (см. блок «BPSK»).

6.5 Измените параметр «Phase offset (rad)» блока «BPSK» на $\pi/4$, $\pi/2$ и проделайте п. п. 6.3.-6.4. Сравните кривые помехоустойчивости и поясните изменения.

7. КОДОВОЕ УПЛОТНЕНИЕ КАНАЛОВ

ВВОДНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Идея *кодového уплотнения* (разделения) каналов известна уже около 80 лет и базируется на корреляционных свойствах сигналов. Её развитие приходится на 60-е г.г. XX ст., когда были разработаны сравнительно быстродействующие электронные логические схемы и аппаратура с кодовым разделением каналов стала приемлемых размеров. Этот новый метод впервые начал использоваться в связных радиостанциях в помехоустойчивых системах специального назначения. Использовался широкополосный сигнал с «прыгающей» по определенному закону радиочастотой. Такая реализация значительно усложняла прослушивание переговоров и кроме того имела высокие качественные показатели.

В англоязычной литературе системы с кодовым разделением каналов называются Code Division Multiple Access (CDMA), что дословно в переводе на русский язык означает множественный доступ с кодовым разделением. Уплотнение сигналов по форме (коду) требует введения понятия корреляции сигналов. *Взаимокорреляционной функцией* (ВКФ) $R_{12}(\tau)$ сигналов $s_1(t)$ и $s_2(t)$, обладающих конечными энергиями, называется функция, определяемая выражением

$$R_{12}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} s_1(t)s_2(t-\tau)dt,$$

где t – время; τ – величина сдвига во времени второго сигнала относительно первого.

Фундаментальный физический смысл ВКФ есть *степень подобия двух сигналов*. Частным случаем ВКФ является *автокорреляционная функция* (АКФ), когда $s_1(t) = s_2(t)$. Чем больше «похожи» сигналы друг на друга, тем большее положительное значение имеет ВКФ. Если значение функции $R_{12}(\tau)$ имеет наибольшее абсолютное значение и отрицательный знак, то говорят, что сигналы $s_1(t)$ и $s_2(t)$ противоположны, т. е. $s_1(t) = -s_2(t)$. Для кодового разделения каналов, применяемого в CDMA, важен третий случай, когда $R_{12}(\tau) = 0$ в точке $\tau = \tau_0$, либо $R_{12}(\tau) \approx 0$ на всем отрезке определения сдвига τ . Сигналы, удовлетворяющие первому равенству, называются *ортогональными «в точке»*, удовлетворяющие второму приближительному равенству – *квазиортогональными*. Сигналов, для которых ВКФ строго равна нулю при всех временных сдвигах, не существует, поэтому в дальнейшем, говоря об ортогональных кодах, будем подразумевать ортогональные «в точке». В рамках указанного случая рассматривают два типа адресных систем с кодовым уплотнением каналов: синхронные и асинхронные.

Замысел кодового уплотнения каналов на примере линии «вниз», т. е. от базовой станции (БС) к абонентской (АС), сводится к следующему:

1 N информационным потокам, предназначенным для N абонентов, присваивается своя кодовая псевдослучайная последовательность (ПСП);

2 кодовые последовательности некоррелированы друг с другом;

3 бинарные информационные потоки модулируются собственной ПСП;

4 каналные широкополосные сигналы складываются в суммирующем устройстве;

5 модуляция несущей результирующим сложным широкополосным сигналом и излучение радиосигнала в пространство.

На приемной стороне в абонентской станции:

1 известна «своя» кодовая последовательность;

2 осуществляется перенос сигнала с радиочастоты в область низких частот;

3 низкочастотный импульсный сигнал поступает на вход коррелятора, на второй вход которого синхронно поступает кодирующая ПСП; коррелятор, состоящий из перемножителя и интегратора, вычисляет взаимокорреляционную функцию двух сигналов;

4 отклик на выходе коррелятора происходит только тогда, когда в уплотнённом сложном сигнале присутствует «своя» ПСП, в противном случае на выходе наблюдается только шум.

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

В качестве системы ортогональных функций взяты строки матрицы Адамара размером $[8 \times 8]$. Для кодирования информационного нуля определённого канала передачи используется некоторая строка матрицы, известная на приёмной стороне. Для кодирования информационной единицы используется та же строка, но с инверсией (см. рис. 7.1).

Первому каналу (D1) соответствует нулевая строка матрицы Адамара; последнему, восьмому (D8), – седьмая. Уплотнение каналов осуществляется по принципу мажоритарного суммирования.

Результирующий групповой двоичный сигнал подаётся на фазовый модулятор (см. рис. 7.2). Модуляция по фазе осуществляется на углы 0 и π .

Проходя через канал с аддитивными и мультипликативными помехами, сигнал поступает на вход приёмного устройства (см. рис. 7.3), где осуществляется фазовая демодуляция сигнала. На выходе приёмника наблюдается групповой сигнал, искажённый помехами.

С выхода приёмника (аналоговая часть) групповой сигнал поступает на устройство декодирования сигнала (цифровая часть), в котором осуществляется извлечение канальных данных. Модель декодера приведена на рисунке 7.4.

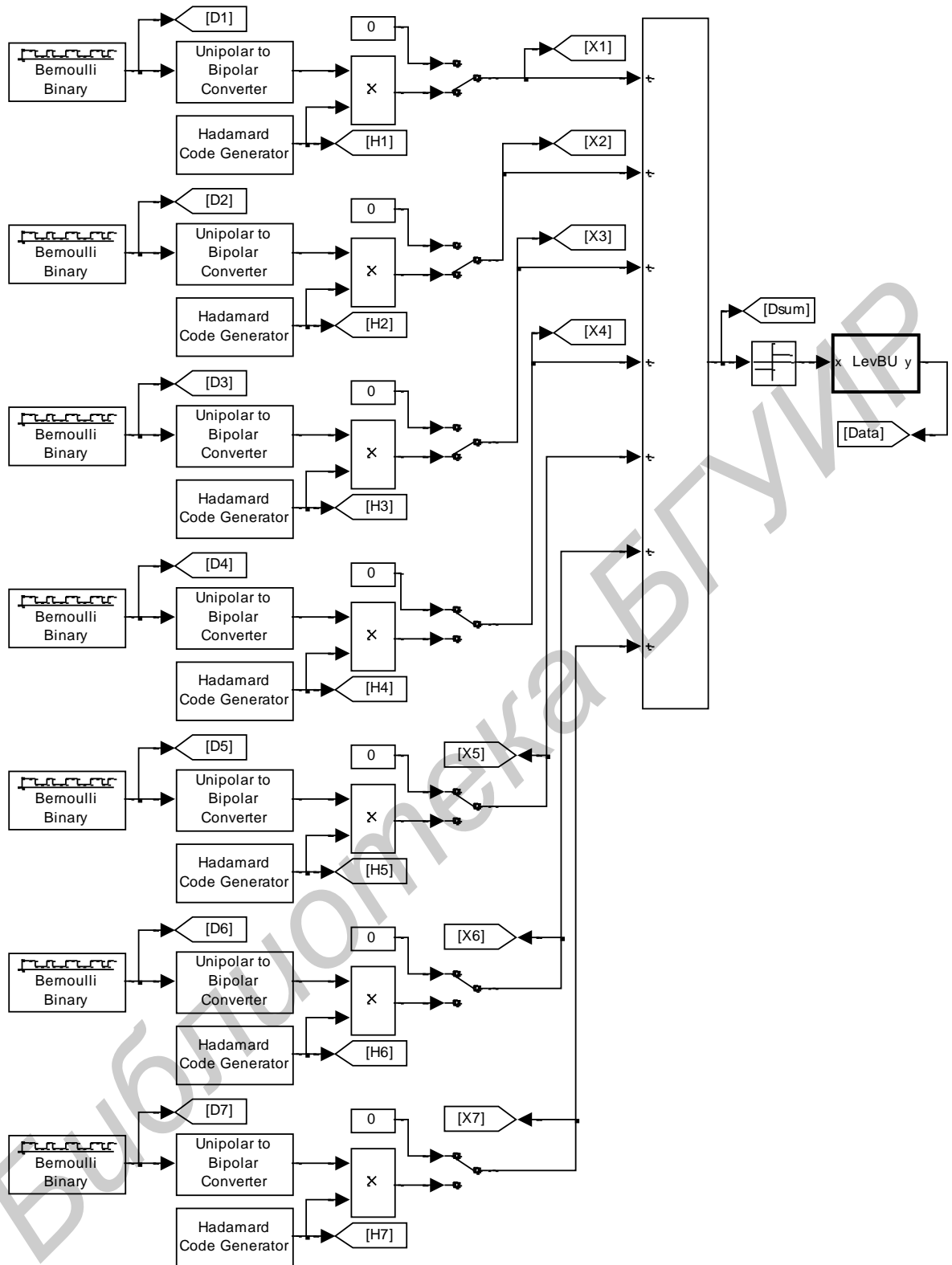


Рис. 7.1

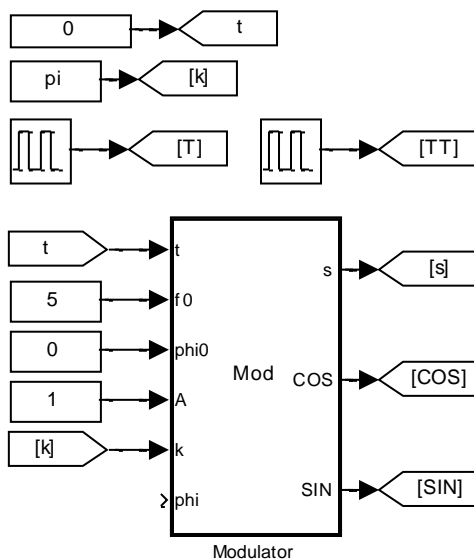


Рис. 7.2

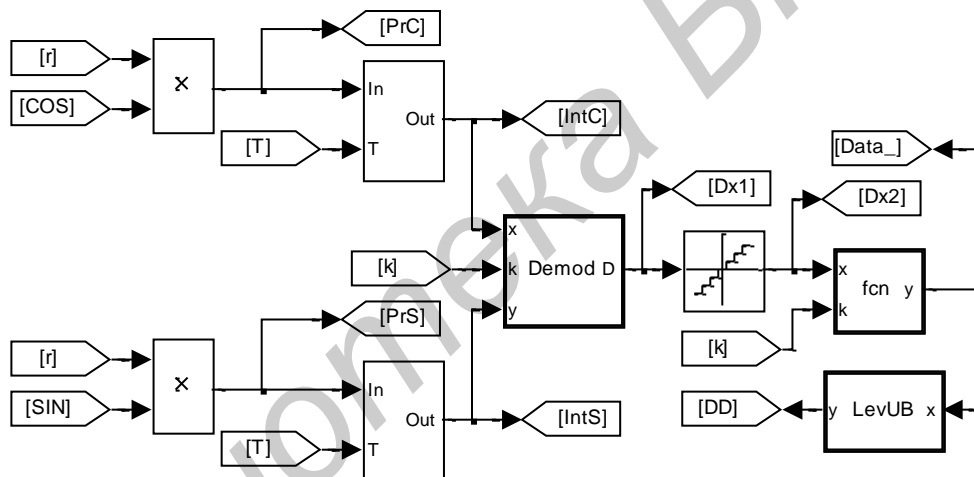


Рис. 7.3

Модель создана весьма гибкой и позволяет передавать и обрабатывать групповой сигнал различной ёмкости. Для этого в передающем и приёмном устройствах введены коммутаторы информационных потоков. Для однозначности результатов на выходе мажоритарного сумматора, а значит и для самой возможности декодирования сигнала, необходимо, чтобы количество информационных потоков, передаваемых в групповом сигнале, было нечётным: 1 (тривиальный случай), 3, 5 или 7.

Сигнал передаётся в канале с АБГШ и релейскими замираниями сигнала. Это значит, что модель максимально приближена к реальным условиям работы систем подвижной цифровой радиосвязи с кодовым уплотнением сигналов.

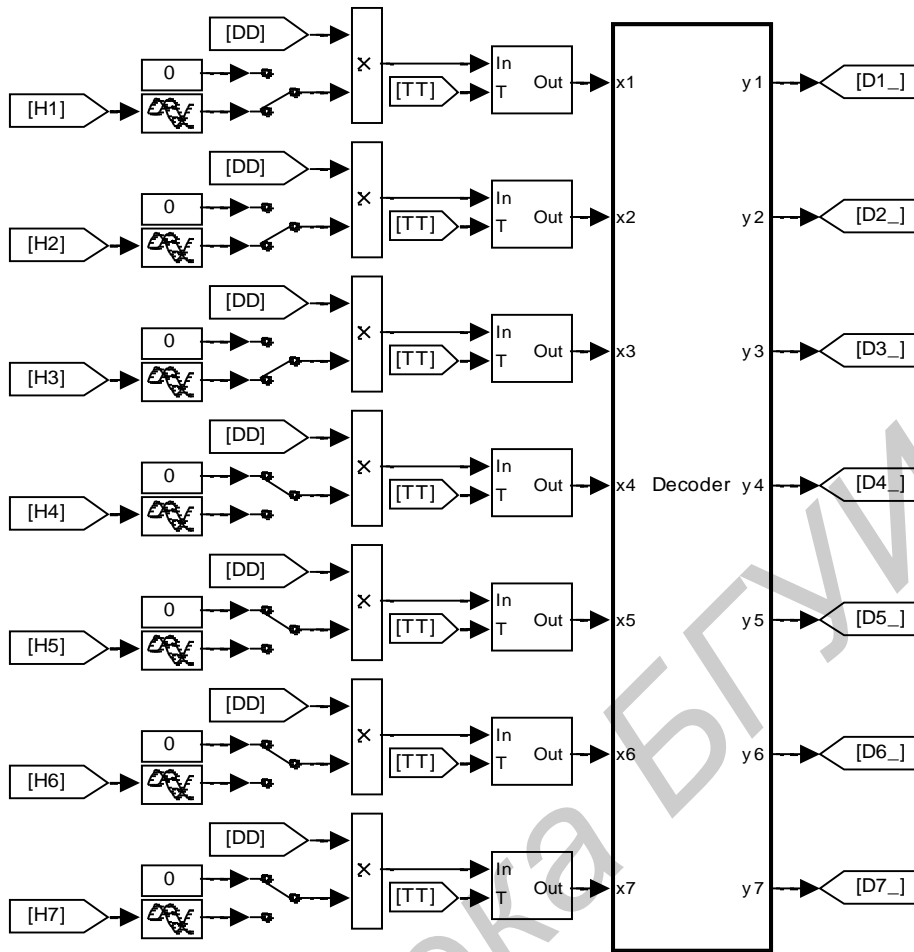


Рис. 7.4

В численную модель введены также средства регистрации и визуализации.

1) Оценитель отношения сигнал/шум в канале связи (рис. 7.5).

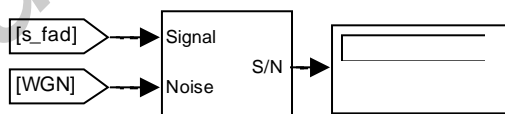


Рис. 7.5

2) Счётчик ошибок в принятом групповом сигнале (см. рис. 7.6).

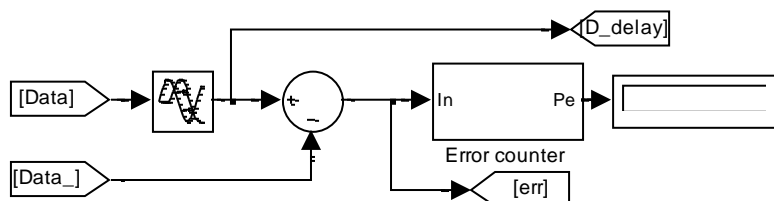


Рис. 7.6

3) Счётчики канальных ошибок (рис. 7.7)

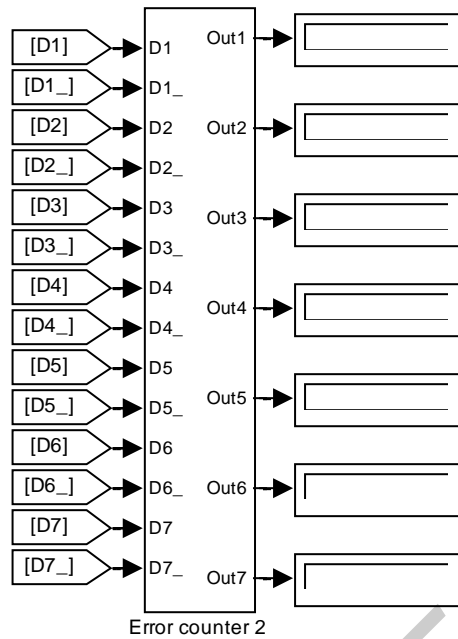


Рис. 7.7

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

7.1. Составление структурной и функциональной схем численной модели

Внимательно изучите каждый элемент модели. Посмотрите, какие параметры задают функциональность блоков, поясните их физический смысл. Как осуществляется уплотнение сигналов? Что в модели формирует сообщение? Как осуществляется демодуляция сигнала и извлечение канальных потоков? Укажите назначение элементов, составьте структурную и функциональную схемы передающего устройства и приёмного устройства

7.2. Осциллограммы в точках схемы

Установите значение мощности БГШ равное нулю. Отключите генератор мультипликативной помехи. Проверьте значения параметров модели: несущая частота $f_0 = 5$; $\varphi_0 = 0$; $\tau_{\text{инф}} = 8$ (параметр «Sample time» блока «Bernoulli Binary»); номера строк матриц матрицы Адамара для каждого канала на передающей стороне должны соответствовать аналогичным каналам на приёмной; параметр «Sample time» блоков «Hadamard Code Generator» должен быть везде одинаков и равен 1.

Отключите 4 последних источника информации (двойной щелчок мыши на соответствующих коммутаторах). Запустите модель на выполнение и

зарисуйте осциллограммы в точках схемы. Поясните вид осциллограмм. Поясните принцип мажоритарного суммирования на конкретном примере.

7.3. Кодовое уплотнение трёх потоков данных

7.3.1. Отключите генератор мультипликативной помехи. Изменяя дисперсию генератора БГШ (параметр «Variance» блока «Gaussian») с неравномерным шагом от 200 до нуля, зафиксируйте значение отношения С/Ш, количество ошибочных символов на интервале наблюдения и количество ошибочно принятых бит информации во всех каналах. Постройте графики зависимостей вероятности ошибки приёма от отношения С/Ш, сделайте выводы.

Для увеличения статистики можно изменять длительность наблюдения сигнала, увеличивая глобальный параметр модели «Simulation stop time» на панели инструментов.

7.3.2. Подключите генератор мультипликативной помехи, дисперсию БГШ сделайте равной нулю. Установите параметр «Stopband edge frequency» блока «cheby2» равным $2\pi \cdot 0.1$.

Изменяя параметр «Sigma» блока «Rayleigh» от 0.1 до 40 с неравномерным шагом фиксируйте количество ошибочных символов и СКО флуктуаций амплитуды сигнала. Изобразите график зависимости вероятности ошибки приёма от отношения С/Ш, сделайте выводы.

7.3.3. Установите значение «Sigma» блока «Rayleigh» – 1, сохранив остальные параметры системы неизменными. Изменяя дисперсию БГШ от 0 до 100, постройте кривые помехоустойчивости, сделайте выводы о степени влияния БГШ и мультипликативной помехи на качество приёма группового сигнала и канальных сигналов.

7.3.4. Последовательно устанавливая значения «Stopband edge frequency» блока «cheby2» равными $2\pi \cdot 0.5$ и $2\pi \cdot 1$, исследуйте систему согласно п. 7.3.3. При моделировании фиксируйте среднее значение и СКО мультипликативной помехи.

7.4. Кодовое уплотнение пяти потоков данных

Подключите 5 источников данных к формирователю и, соответственно, подайте 5 сигналов на вход декодера. Исследуйте помехоустойчивость системы согласно п. 7.3.

Сравните кривые помехоустойчивости. Как влияет количество потоков передаваемых данных на вероятности канальных ошибок?

7.5. Кодовое уплотнение семи потоков данных

Подключите 7 источников данных к формирователю и, соответственно, подайте 7 сигналов на вход декодера. Исследуйте помехоустойчивость системы согласно п. 7.3.

Сравните кривые помехоустойчивости. Найдите минимальные отношения сигнал/шум, при которых вероятность канальных ошибок не превышает 10^{-3} для каждой ёмкости канала.

8. АЛГОРИТМЫ СЛЕЖЕНИЯ ЗА ФАЗОЙ КОЛЕБАНИЯ

ВВОДНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Обязательным элементом устройств демодуляции сигналов является наличие опорного (эталонного) генератора гармонического колебания, начальная фаза и частота которого должна точно совпадать с начальной фазой и частотой несущей принимаемого колебательного процесса. При передаче сигнала по радиоканалу неизбежно возникает неопределённость начальной фазы несущего колебания в точке приёма, а значит и на входе устройства обработки сигнала, что не позволяет простыми методами осуществить когерентную обработку принятого узкополосного процесса.

Существует два подхода к решению проблемы когерентности при демодуляции сигналов: 1) использование пилот-сигналов, которые позволяют на приёмной стороне оценить параметры канала передачи, в т. ч. и фазовый сдвиг сигнала; 2) использование устройств слежения за фазой сигнала в самом демодуляторе. Качество слежения за фазой сигнала, или фазовая синхронизация, во многом определяет уровень помехоустойчивости системы в целом.

На примере демодуляции фазомодулированного сигнала в работе рассматриваются три известные схемы слежения за фазой колебания, по другому называемые *схемы восстановления несущей* или *устройства формирования опорного сигнала (УФОС)*: схема А. А. Пистолькорса (рис. 8.1), схема В. И. Сифорова (рис. 8.2) и схема Д. Костаса (рис. 8.3).

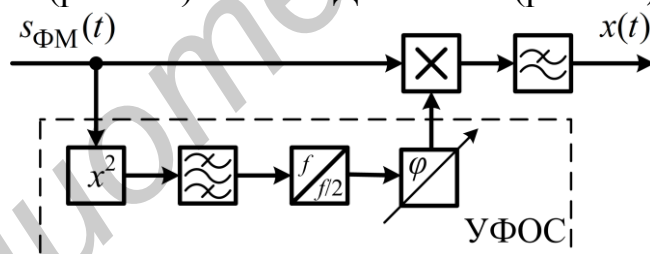


Рис. 8.1

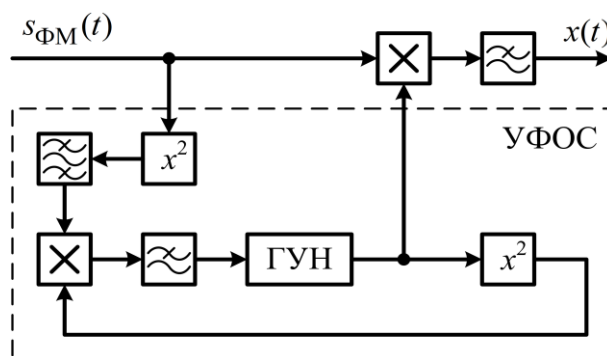


Рис. 8.2

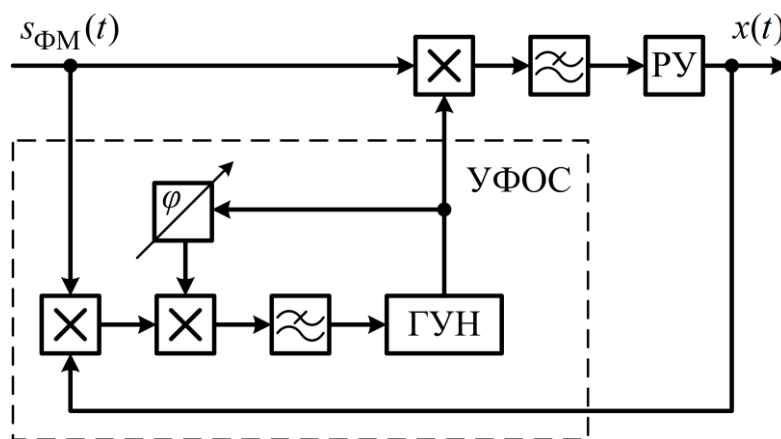


Рис. 8.3

В схеме Пистолькорса УФОС состоит из квадратора, узкополосного фильтра, выделяющего удвоенную частоту несущей сигнала, делитель частоты на 2 и элемента компенсации фазового сдвига.

В схеме Сифорова используется слежение за фазой сигнала в петле фазовой автоподстройки частоты. Разница фаз формируется по удвоенной частоте и сигнал, пропорциональный этой разнице, поступает на генератор, управляемый напряжением (ГУН). Фаза колебания на выходе ГУН должна отличаться на угол $\pi/2$.

Схема Костаса работает аналогично, с той лишь разницей, что съём модуляции осуществляется не путём возведения входного сигнала в квадрат, как в схеме Сифорова, а введением обратной связи с выхода демодулятора.

ОПИСАНИЕ МОДЕЛЕЙ СХЕМ

Особенность моделирования вышеперечисленных схем восстановления несущей состоит в том, что необходимо тщательно компенсировать задержки сигналов, возникающие в линейных фильтрах. Общий вид моделей приведён на рисунках (8.4–8.6).

Отладку УФОС необходимо проводить при отсутствии модуляции и канальных помех, как аддитивных, так и мультипликативных. В процессе отладки подбираются задержки элементов «Transport Delay» таким образом, чтобы на выходе демодулятора в стационарном режиме был 0. Мерой оценки качества слежения за фазой является дисперсия сигнала на выходе УФОС. Чем она меньше, тем лучше отслеживается фаза входного сигнала.

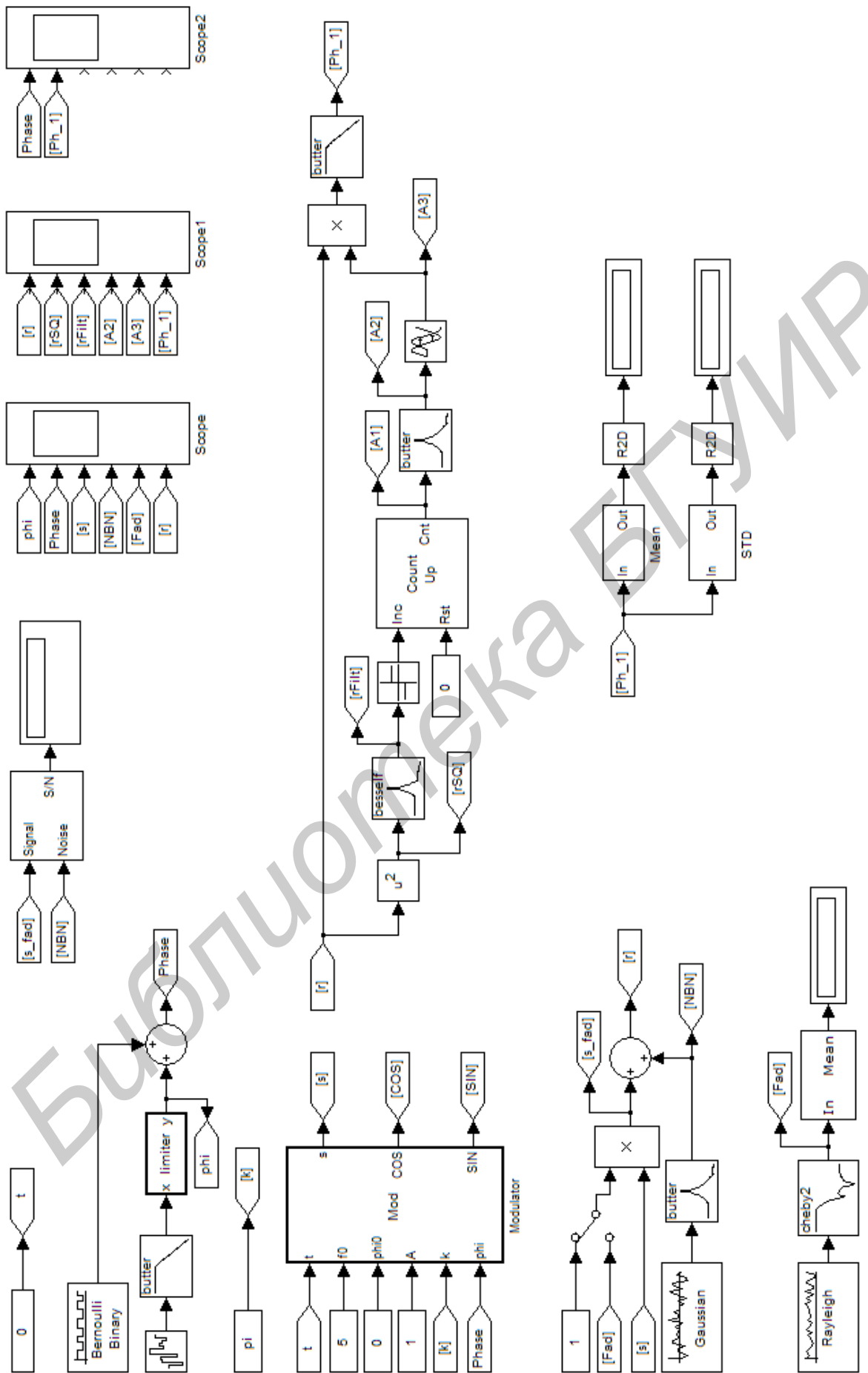


Рис. 8.4

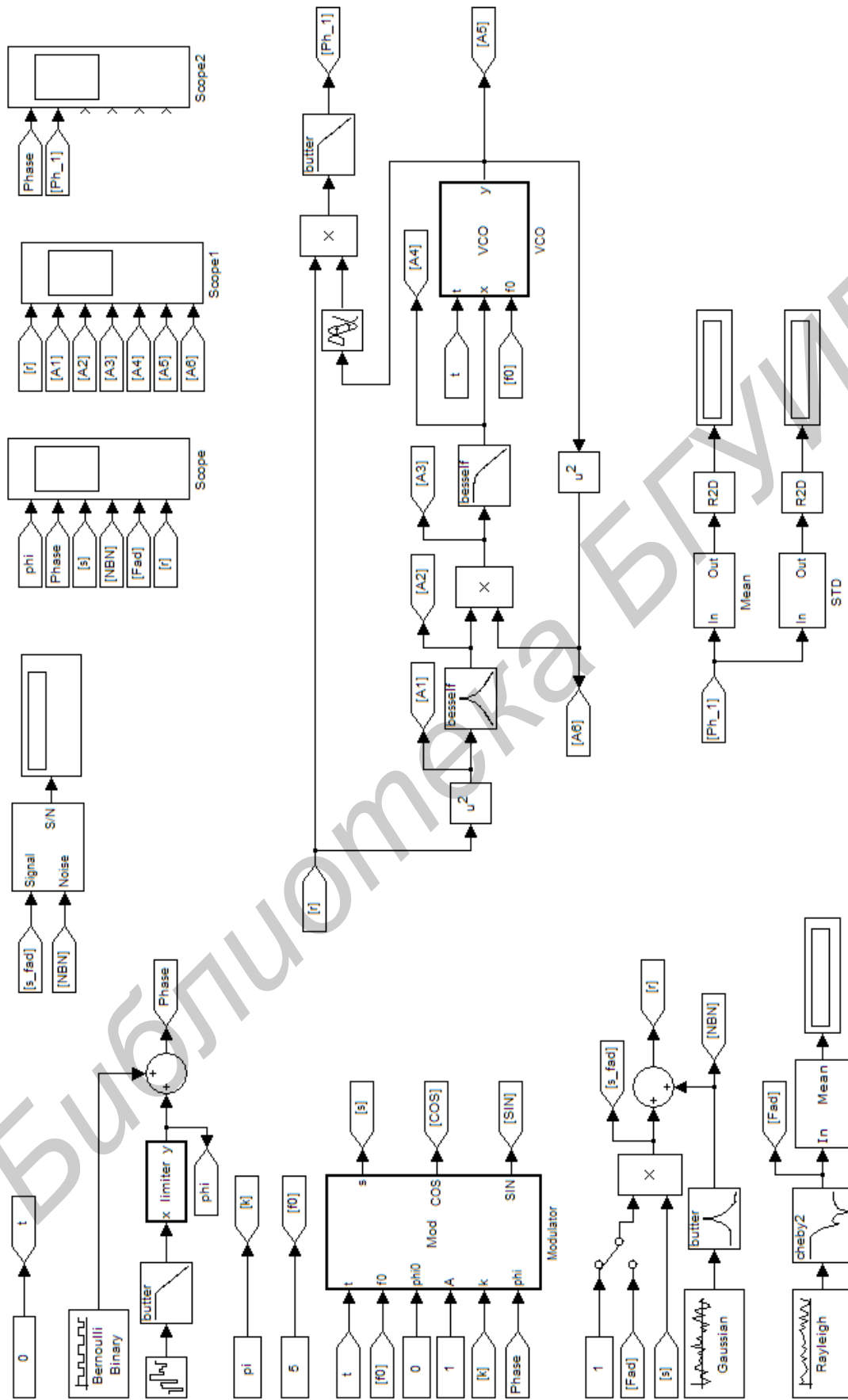


Рис. 8.5

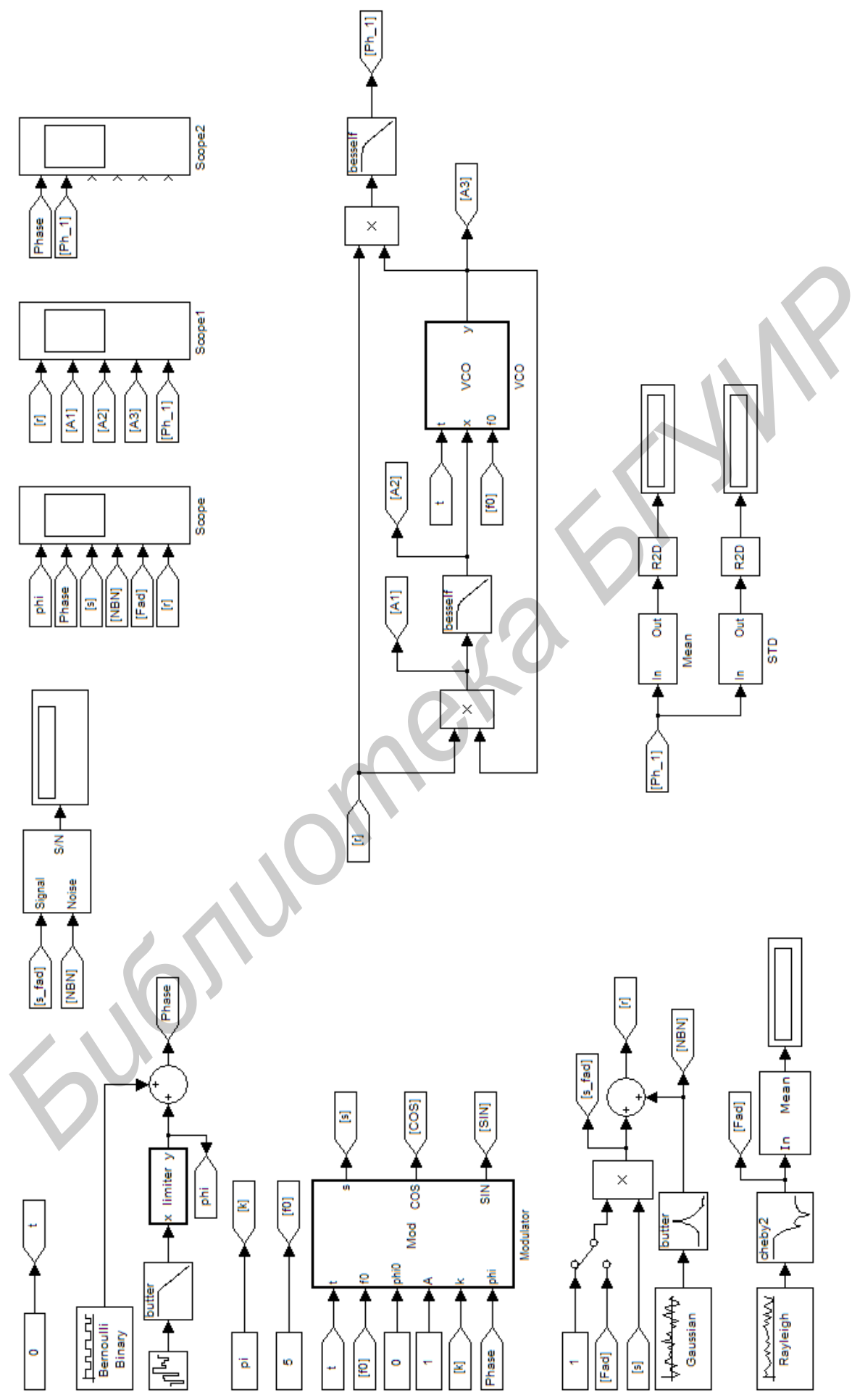


Рис. 8.6

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Исследование схемы А. А. Пистолькорса

8.1. Загрузите файл MODEL_8a. Установите следующие начальные параметры модели:

- 1) замирания в канале отключены;
- 2) дисперсия АБГШ – 0 (параметр «Variance» блока «Gaussian»);
- 3) параметр «Probability of zero» блока «Bernoulli Binary» – 1;
- 4) Параметр «Noise power» блока «Band Limited White Noise» – 0;
- 5) частота «f0» – 5; амплитуда «A» – 1; индекс фазовой модуляции «k» – «pi».

Запустите модель на исполнение. Зарисуйте осциллограммы в точках, если «Ph_1» равен нулю. В ином случае подберите необходимую задержку «Delay» блока «Transport Delay».

Установите параметр «Noise power» блока «Band Limited White Noise» – 10; «Probability of zero» – 0,5. Зарисуйте осциллограмму процесса на выходе («Ph_1»). Сравните с процессом «Phase», сделайте выводы.

8.2. Установите параметр «Probability of zero» – 1. Изменяя параметр «Variance» блока «Gaussian» от 100 до 0 с неравномерным шагом, фиксируйте значения математического ожидания и дисперсии оценки фазы.

Для увеличения статистики можно изменять длительность наблюдения сигнала, увеличивая глобальный параметр модели «Simulation stop time» на панели инструментов.

Постройте графики зависимости этих параметров от отношения сигнал/шум.

8.3. Подключите к модели постановщик мультипликативных помех. Повторите п. 8.2 для следующих параметров «Sigma» блока «Rayleigh Noise Generator»: 1; 5; 25.

Изобразите кривые дисперсии и математического ожидания оценки начальной фазы.

Исследование схемы В. И. Сифорова

Загрузите файл MODEL_8b и проделайте для данной модели п. п. 8.1-8.3. Сравните результаты.

Исследование схемы Д. Костаса

Загрузите файл MODEL_8c и проделайте для данной модели п. п. 8.1-8.3. Сравните полученные результаты с результатами п. п. 2 и 3.

Какие выводы о применении исследованных схем в системах передачи информации можно сделать?

ЛИТЕРАТУРА

1. Madhow, U. Fundamentals of digital communications / U. Madhow. – Cambridge University Press, 2008. – 519 p.
2. Crane, R. K. Propagation handbook for wireless communication system design / R. K. Crane. – CRC Press, 2003. – 309 p.
3. Феер, К. Беспроводная цифровая связь / К. Феер – М. : Радио и связь, 2000. – 520 с.
4. Прокис, Дж. Цифровая связь / Дж. Прокис – М. : Радио и связь, 2000. – 800 с.
5. Скляр, Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Б. Скляр. – 2-е изд. – М. : Издат. дом «Вильямс», 2003. – 1104 с.
6. Simon, M. K. Digital communications over fading channels / M. K. Simon, M. S. Alouini. – John Wiley & Sons, Inc, 2000. – 551 p.
7. Glover, I. Digital communications / I. Glover, P. Grant. – Prentice Hall, 1998. – 764 p.
8. Jeruchim, M. C. Simulation of communication systems. Modeling, methodology, and techniques // 2nd ed. / M. C. Jeruchim, P. Balaban, K. S. Shanmugan. – Kluwer academic publishers, 2002. – 937 p.
9. Чердынцев, В. А. Оптимизация информационных систем / В. А. Чердынцев, В. В. Дубровский – Минск: БГУИР, 2005. – 180 с.
10. Чердынцев, В. А. Системы передачи информации с расширением спектра сигналов / В. А. Чердынцев, В. В. Дубровский – Минск: БГУИР, 2009. – 132 с.

Учебное издание

Дубровский Василий Викторович
Курочкин Александр Евдокимович

**ТЕОРИЯ ЦИФРОВОЙ РАДИОСВЯЗИ И
КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ УСТРОЙСТВ**

Лабораторный практикум
для студентов специальности 1-39 01 01-02
Радиотехника (техника цифровой радиосвязи)
дневной формы обучения

Редактор И. П. Острикова
Корректор

Подписано в печать	Формат 60×84 1/16.	Бумага офсетная
Гарнитура «Таймс».	Отпечатано на ризографе.	Усл. печ. л. 6,0.
Уч.-изд. л. 3,5.	Тираж 100 экз.	Заказ 437.

Издатель и полиграфическое исполнение: Учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и
радиоэлектроники»
ЛИ № 02330/0494371 от 16.03.2009. ЛП № 02330/0494175 от 03.04.2009.
220013, Минск, П. Бровки, 6