

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Омский государственный технический университет»

РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

*Учебное текстовое электронное издание
локального распространения*

Омск
Издательство ОмГТУ
2017

Составители: *П. И. Пузырев, А. Н. Ляшук*

Радиотехнические устройства передачи информации : метод. указания к лаб. работам / Минобрнауки России, ОмГТУ ; [сост.: П. И. Пузырев, А. Н. Ляшук]. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2017.

Представлены методические рекомендации к выполнению лабораторных работ, посвященных анализу и моделированию радиотехнических систем передачи информации в программе MathLab.

Издание адресовано студентам дневной и заочной форм обучения по специальностям 11.04.01 «Радиотехника», 11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», 11.04.03 «Конструирование и технология электронных средств», 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника», 12.04.01 «Приборостроение», а также слушателям курсов переподготовки и повышения квалификации.

*Рекомендовано редакционно-издательским советом
Омского государственного технического университета*

© ОмГТУ, 2017

1 электронный оптический диск

Оригинал-макет издания выполнен в Microsoft Office Word 2007/2010 с использованием возможностей Adobe Acrobat Reader.

Минимальные системные требования:

- процессор Intel Pentium 1,3 ГГц и выше;
- оперативная память 256 Мб и более;
- свободное место на жестком диске 260 Мб и более;
- операционная система Microsoft Windows XP/Vista/7/10;
- разрешение экрана 1024×768 и выше;
- акустическая система не требуется;
- дополнительные программные средства Adobe Acrobat Reader 5.0 и выше.

Редактор *М. А. Болдырева*
Компьютерная верстка *О. Н. Савостеевой*
Сводный темплан 2017 г.
Подписано к использованию 30.11.17.
Объем 5,95 Мб.

Издательство ОмГТУ.
644050, г. Омск, пр. Мира, 11; т. 23-02-12
Эл. почта: info@omgtu.ru

ПРЕДИСЛОВИЕ

Радиотехнические системы передачи информации (РТСПИ) широко используются практически во всех сферах жизнедеятельности. Поэтому изучение курса «Радиотехнические системы передачи информации» является важным этапом подготовки радиоинженера. Радиоинженеры в процессе своей деятельности имеют дело с радиосистемами различного назначения и различного уровня сложности. Проектирование сложных радиосистем включает в себя определение принципа действия системы, обоснование и выбор вида сигналов, методов их формирования и обработки.

В настоящем издании приведены методические указания к выполнению лабораторных работ, посвященных изучению свойств и принципов функционирования упрощенных моделей различных РТСПИ. Содержательный материал базируется на знаниях, которые студенты приобрели при изучении, в частности, принципов построения радиоприемных и радиопередающих трактов, элементов теории фильтрации радиосигналов, распространения радиоволн, а также при освоении физики, математики, теоретических основ электротехники, основ радиоэлектроники и ряда других дисциплин.

Целью студентов различных направлений при выполнении лабораторных работ является обобщение и углубление знаний и навыков. Этот вид деятельности должен способствовать гораздо более быстрому пониманию и усвоению принципов работы и возможности любой сложной радиотехнической системы передачи информации, независимо от её технической реализации и используемой элементной базы. Многообразие задач, решаемых с помощью РТСПИ, определяется назначением систем.

Структурно каждая из четырех представленных лабораторных работ состоит из краткой теоретической части, описательной части и непосредственных инструкций к их выполнению. Для облегчения понимания излагаемый материал иллюстрирован большим количеством пояснений. Составителями использован относительно простой математический аппарат и главное внимание обращено на физическую сторону рассматриваемых явлений и процессов. Однако приведённые математические выражения позволяют при необходимости произвести количественную оценку многих параметров РТСПИ.

Издание адресовано студентам дневной и заочной форм обучения по специальностям 11.04.01 «Радиотехника», 11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», 11.04.03 «Конструирование и технология электронных средств», 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника», 12.04.01 «Приборостроение», а также слушателям курсов переподготовки и повышения квалификации.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

Моделирование РТСПИ с двоичной фазовой манипуляцией 2-ФМн

Задания

1. Ознакомиться с описанием модели РТСПИ.
2. Собрать и настроить модель РТСПИ согласно рис. 1.
3. Построить спектры сигнала на выходе передающего устройства, на входе приемного устройства и после приемного фильтра.
4. Построить векторную («звездную») диаграмму сигнала.
5. Определить зависимость вероятности битовой ошибки от отношения E_b/N_0 и сравнить с идеальной кривой.

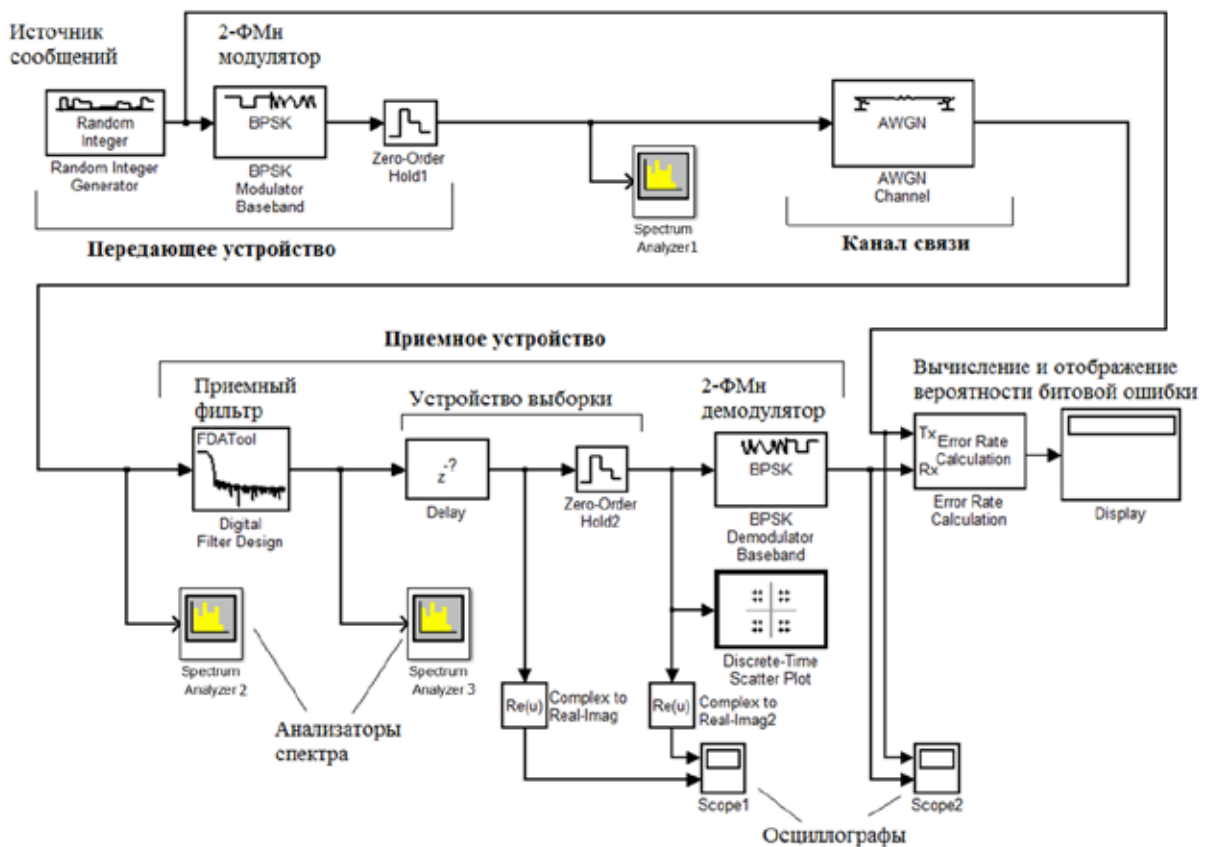


Рис. 1. Упрощенная модель РТСПИ

Варианты

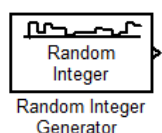
Вариант	1	2	3	4	5	6	7
Битовая скорость, бит/с	600	1200	2400	3600	4800	7200	8400
Вариант	8	9	10	11	12	13	14
Битовая скорость, бит/с	9600	19200	38400	50	100	200	300

Краткое описание модели

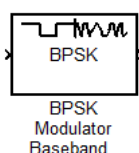
Модель РТСПИ, изображенная на рис. 1, состоит из передающего устройства, канала связи с белым шумом, приемного устройства и измерительных приборов.

Передающее устройство включает в себя:

1. *Источник сообщений*, формирующий псевдослучайную двоичную последовательность.

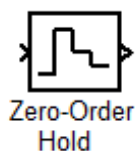


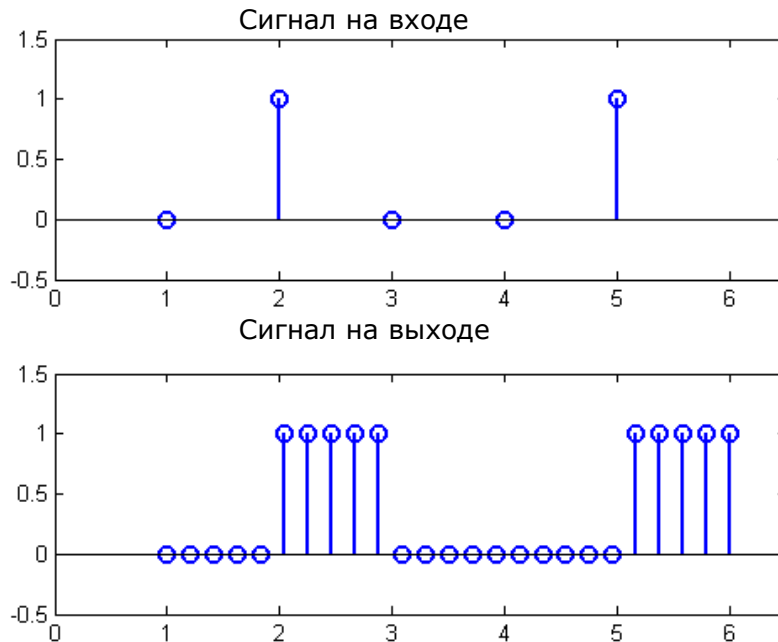
2. *2-ФМн модулятор*, преобразующий цифровой сигнал в сигнал с двоичной фазовой модуляцией. 2-ФМн сигнал на выходе модулятора представлен в комплексной форме без несущей: «1» преобразуется в $-1+i0$ ($Re=-1, Im=0$); «0» преобразуется в $1+i0$ ($Re = 1, Im = 0$).



Пример работы модулятора 2-ФМн

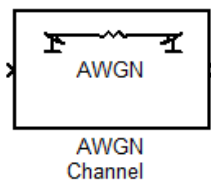
3. Блок *Zero-Order Hold*, повышающий частоту дискретизации, так как на выходе модулятора один символ 2-ФМн сигнала представляется одной выборкой.





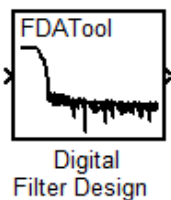
Пример работы блока *Zero-Order Hold*. Повышение частоты дискретизации (интерполяции) в 5 раз

Канал связи включает в себя только один блок – *AWGN Chanel*. Блок *AWGN Chanel* добавляет к сигналу аддитивный белый гауссовский шум с заданным соотношением E_b/N_0 .

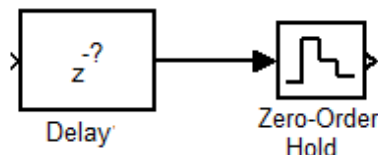


Приемное устройство включает в себя:

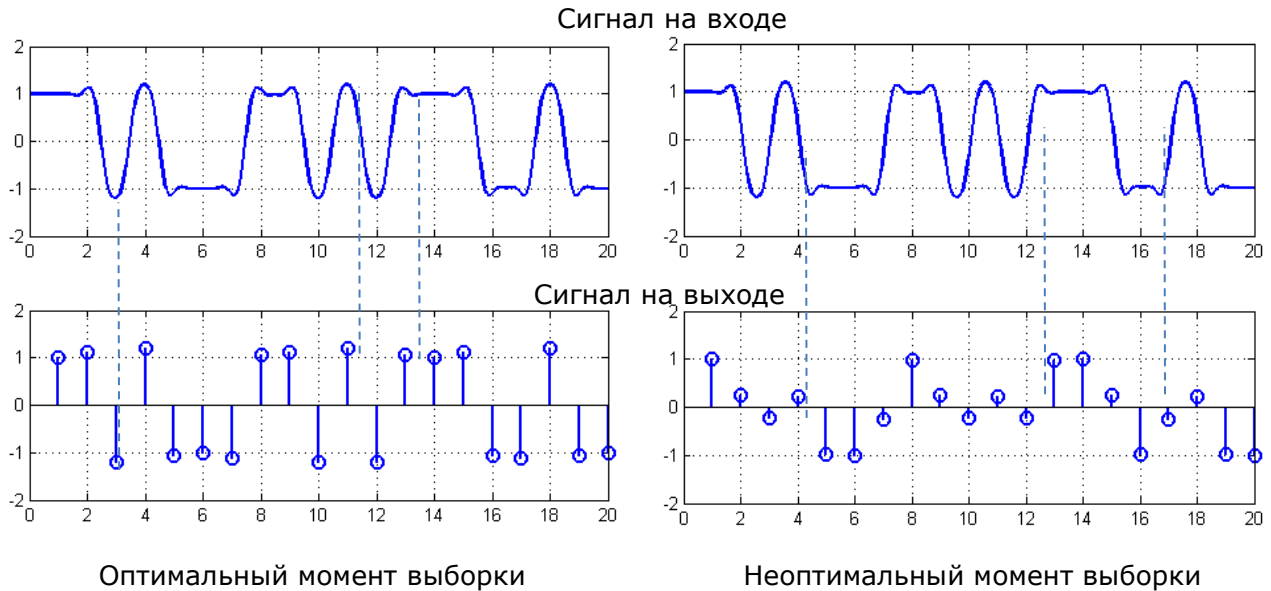
1. *Приемный фильтр*, задача которого сводится к выделению сигнала из шума.



2. *Устройство выборки*, состоящее из двух блоков: блока задержки *Delay* и блока *Zero-Order Hold*.

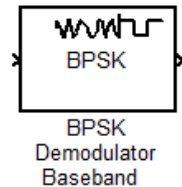


Задача устройства выборки заключается в том, чтобы в оптимальный момент времени произвести выборку сигнала. После устройства выборки сигнал имеет одну выборку на символ.

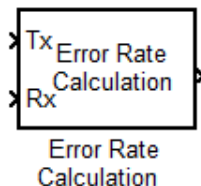


Пример работы устройства выборки

3. 2-ФМн демодулятор, преобразующий фазомодулированный сигнал в двоичный цифровой поток.

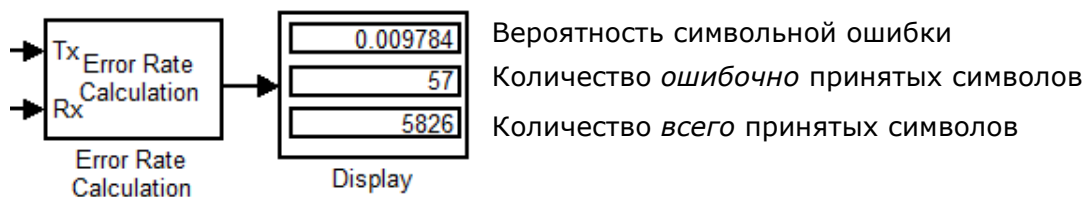


Вычисление вероятности символьной ошибки осуществляется путем сравнения переданных бит и принятых.



Сравнение символов и вычисление вероятности символьной ошибки осуществляется блоком *Error Rate Calculation*. На вход *Tx* подаются эталонные символы с передающего устройства. На вход *Rx* подаются принятые символы с приемного устройства.

Отображение информации осуществляется блоком *Display*.

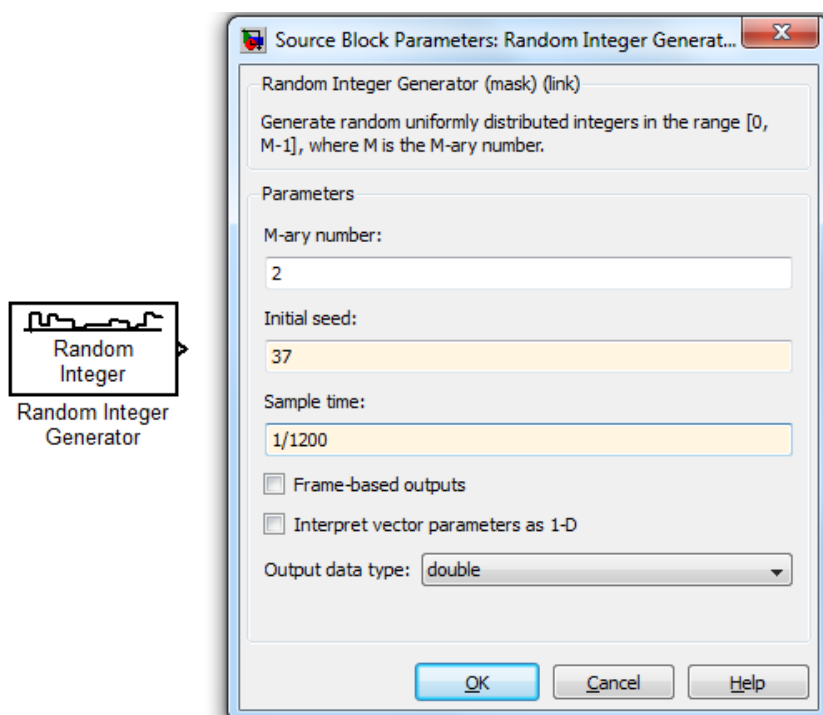


Настройка параметров модели

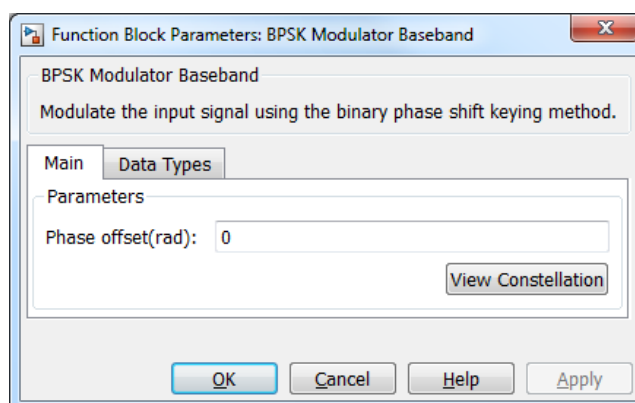
1. В блоке *Random Integer Generator* установить значение **M-ary number** = 2. Параметр **M-ary number** определяет количество возможных уровней выходного сигнала. При **M-ary number** = 2 сигнал имеет два уровня: «0» и «1».

Установить параметр **Sample time** = **1/битовая скорость**. Битовая скорость выбирается согласно варианту.

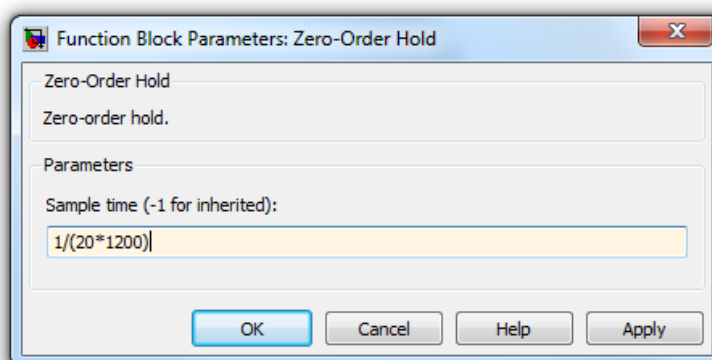
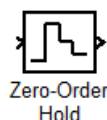
Параметр **Initial seed** оставить по умолчанию. Данный параметр задает начальное значение генератора псевдослучайной последовательности.



2. Оставить настройки блока *BPSK Modulator Baseband* по умолчанию.



3. В блоке *Zero-Order Hold1* установить параметр **Sample time** = $1/(20 * \text{битовая скорость})$, тем самым повышая частоту дискретизации в 20 раз.



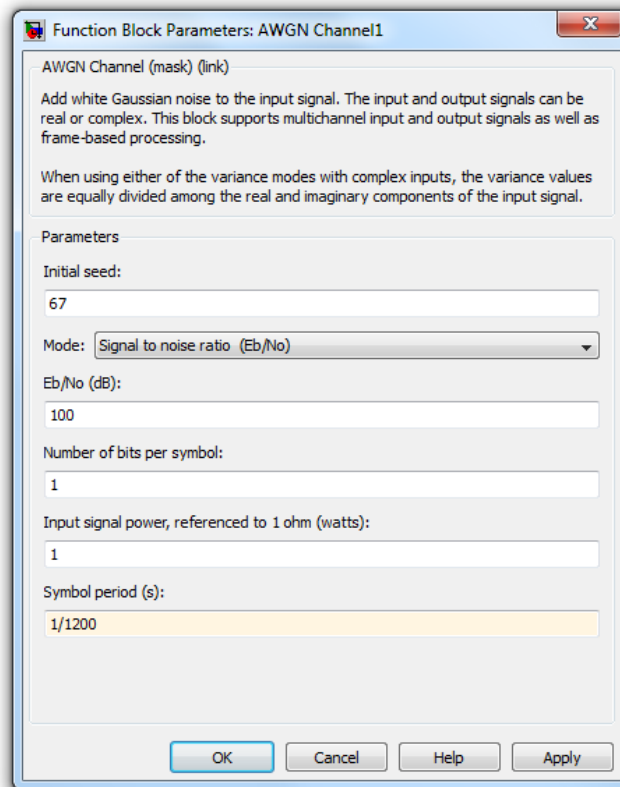
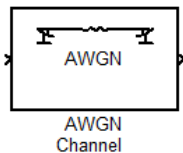
Примечание. Следует обратить внимание на то, что в данной модели РТСПИ присутствуют два блока *Zero-Order Hold*: один является частью передающего устройства (*Zero-Order Hold1*), другой – частью приемного устройства (*Zero-Order Hold2*).

4. В блоке *AWGN Chanel* задать параметр **Eb/No** = **100** дБ, определяющий сигнал/шум. Данное отношение сигнал/шум велико и равносильно отсутствию шума в канале связи. Отсутствие шума в канале необходимо для корректной первоначальной настройки модели.

Параметр **Number of bits per symbol** оставить по умолчанию равным единице. Данный параметр указывает количество бит на символ: для 2-ФМн он равен единице, для 4-ФМн равен 2, для 8-ФМн равен трем, а для 16-КАМ равен четырем.

Параметр **Input signal power** оставить по умолчанию равным единице. Данный параметр показывает значение средней мощности сигнала в ваттах, приведенное к единичному сопротивлению.

Установить параметр **Symbol period = 1/битовая скорость**.

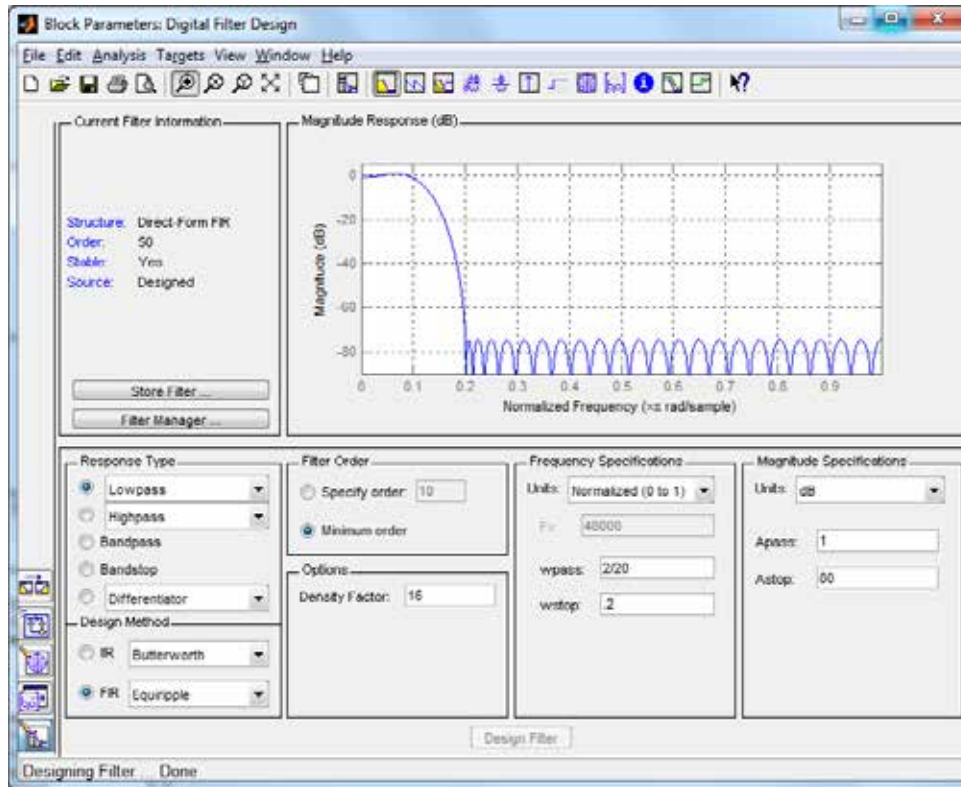


5. В блоке Digital Filter Design задать полосу пропускания через параметр **wpass = 2/20**.

Задать полосу подавления через параметр **wstop = 0.2**. Незначительный «0» можно опускать, поэтому записи *0.2* и *.2* эквивалентны.

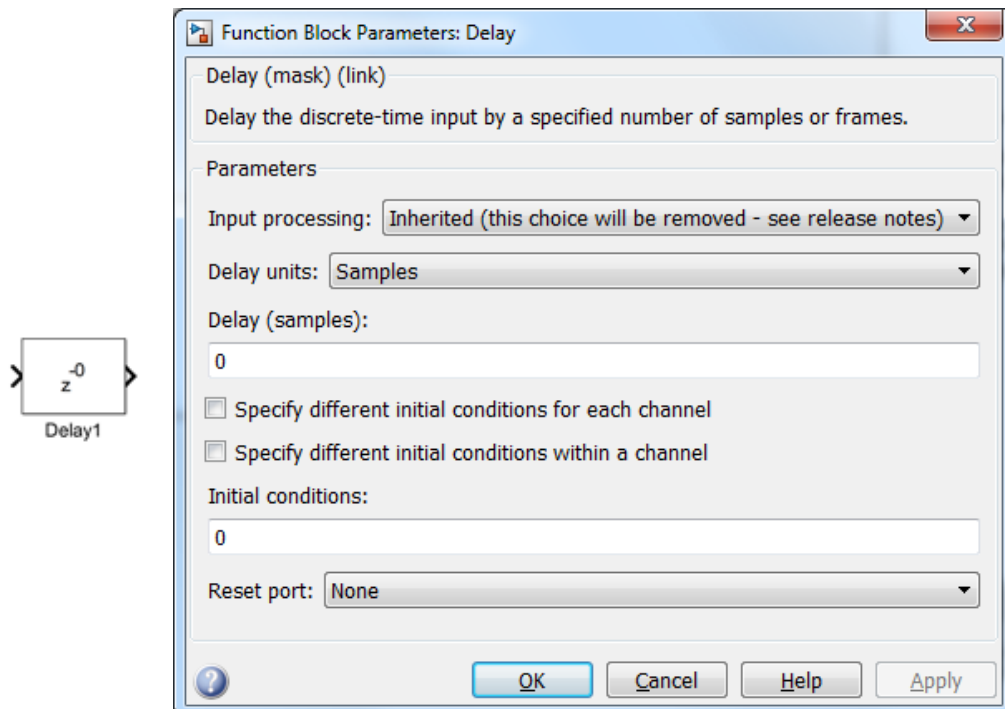
Остальные параметры следует оставить по умолчанию.

Примечание. Данный фильтр не является оптимальным для приема 2-ФМн сигнала. По этой причине кривая, показывающая зависимость вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум, будет отличаться от идеальной, что иллюстрирует важность влияния приемного фильтра на работу системы в целом.

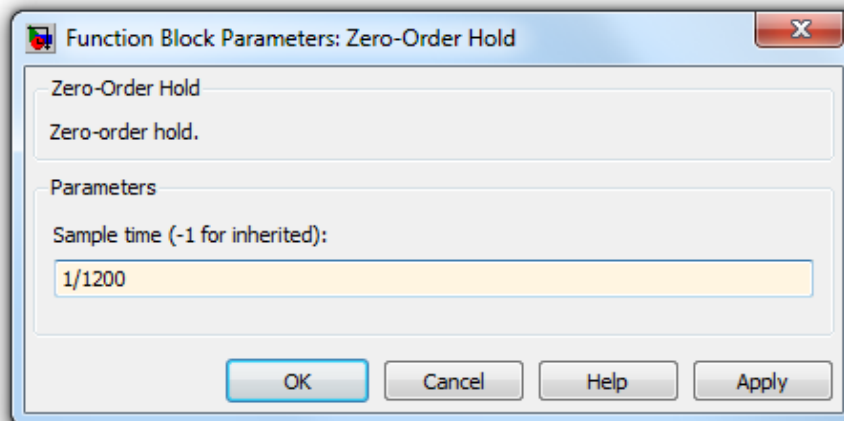
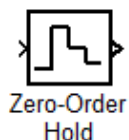


6. В блоке задержки *Delay* установить количество задерживаемых отчетов **Delay = 0**. Данная настройка предварительная, впоследствии она будет откорректирована.

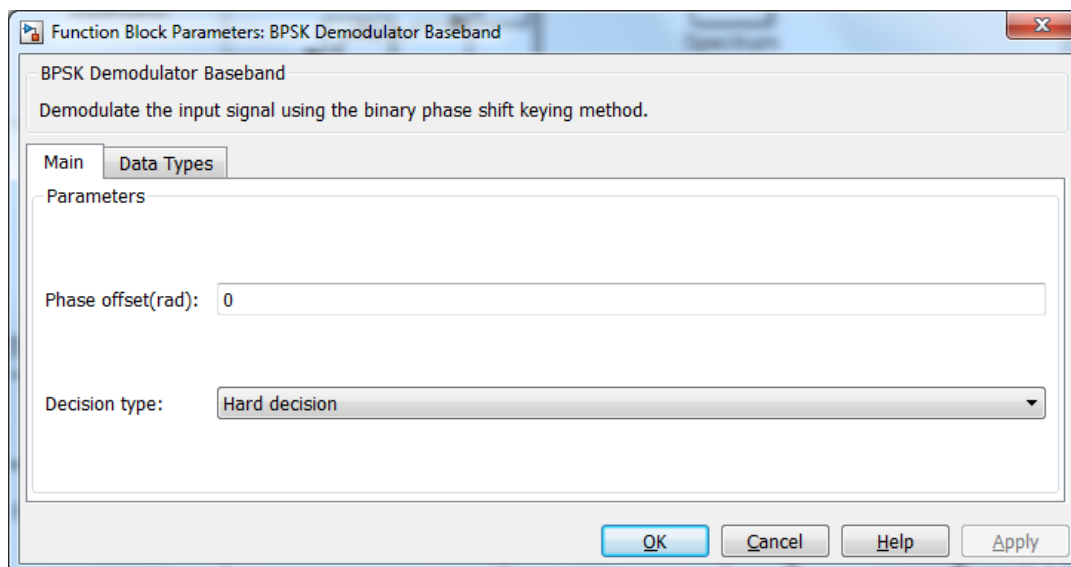
Остальные параметры блока *Delay* оставить по умолчанию.



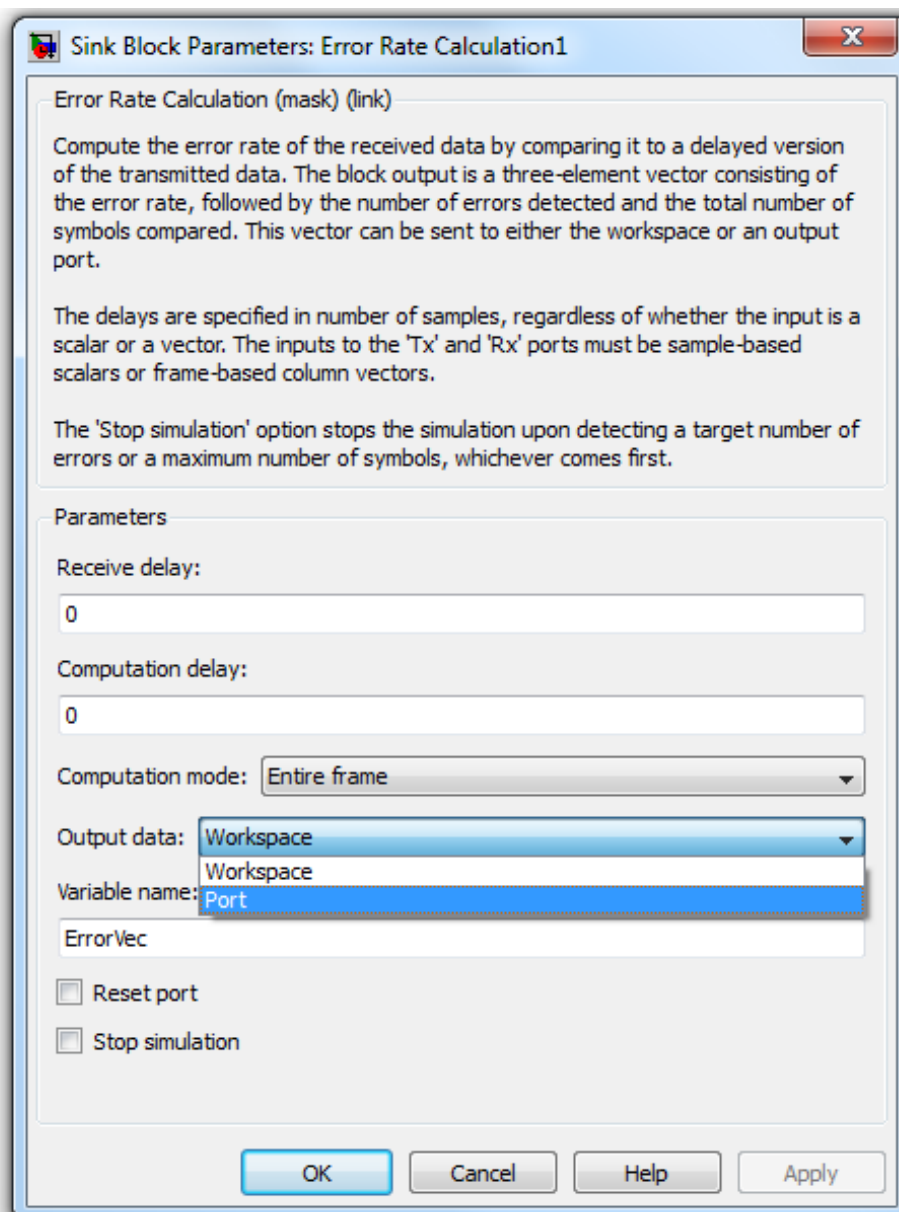
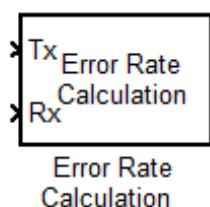
7. В блоке *Zero-Order Hold2*, являющемся частью устройства выборки, установить параметр **Sample time = 1/битовая скорость**.



8. Настройки блока *BPSK Demodulator Baseband* оставить по умолчанию.



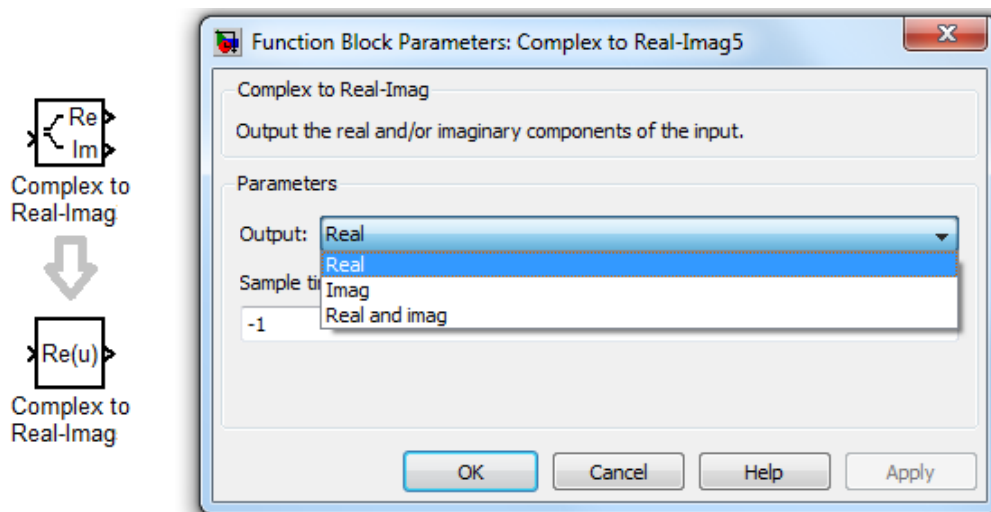
9. В блоке *Error Rate Calculation* в раскрывающемся меню **Output data** выбрать пункт **Port**. Данная настройка задает режим вывода данных в порт, к которому будет подключен блок *Display*. По умолчанию данные выводятся в рабочее пространство *Workspace* в виде массива.




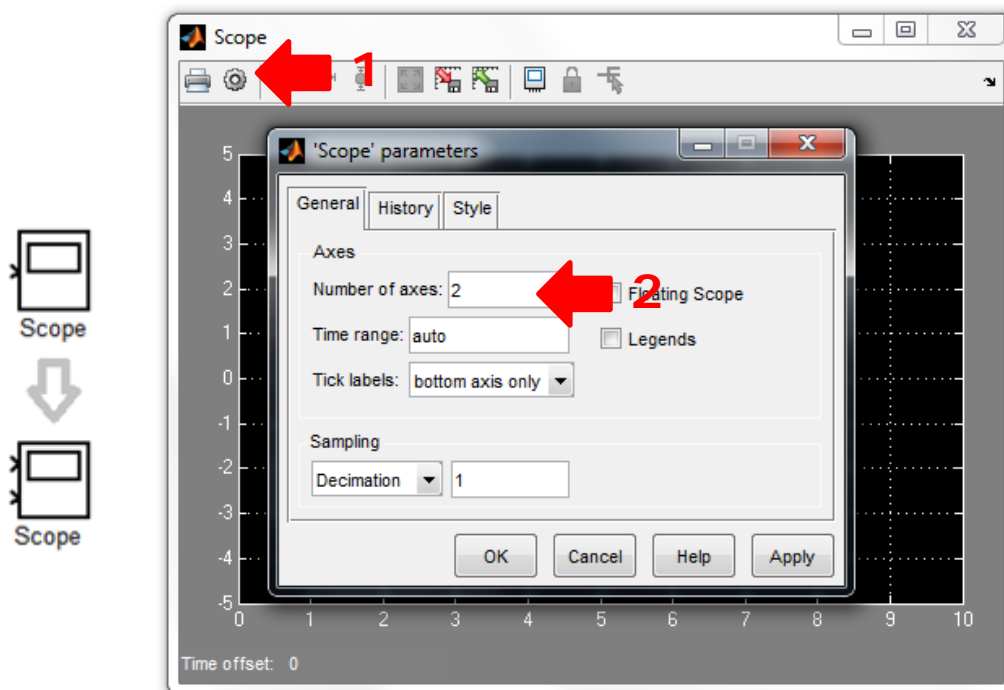
10. В блоке Complex to Real-Imag в раскрывающемся меню **Output** выбрать пункт **Real**.

Блок Complex to Real-Imag разделяет комплексный сигнал на два сигнала: действительная часть (Real) и мнимая часть сигнала (Imag). В результате приведенной настройки у блока Complex to Real-Imag появится только один выход – действительная часть сигнала.


Необходимость наличия блоков Complex to Real-Imag в модели объясняется тем, что осциллографы Scope не умеют отображать комплексные сигналы.



11. Задать количество входов осциллографов Scope1 и Scope2, равное двум. Для этого необходимо нажать на пиктограмму  и в появившемся окне «Parameters» задать значение параметра **Number of axes = 2**.



12. Настроить анализатор спектра Spectrum Analyzer:

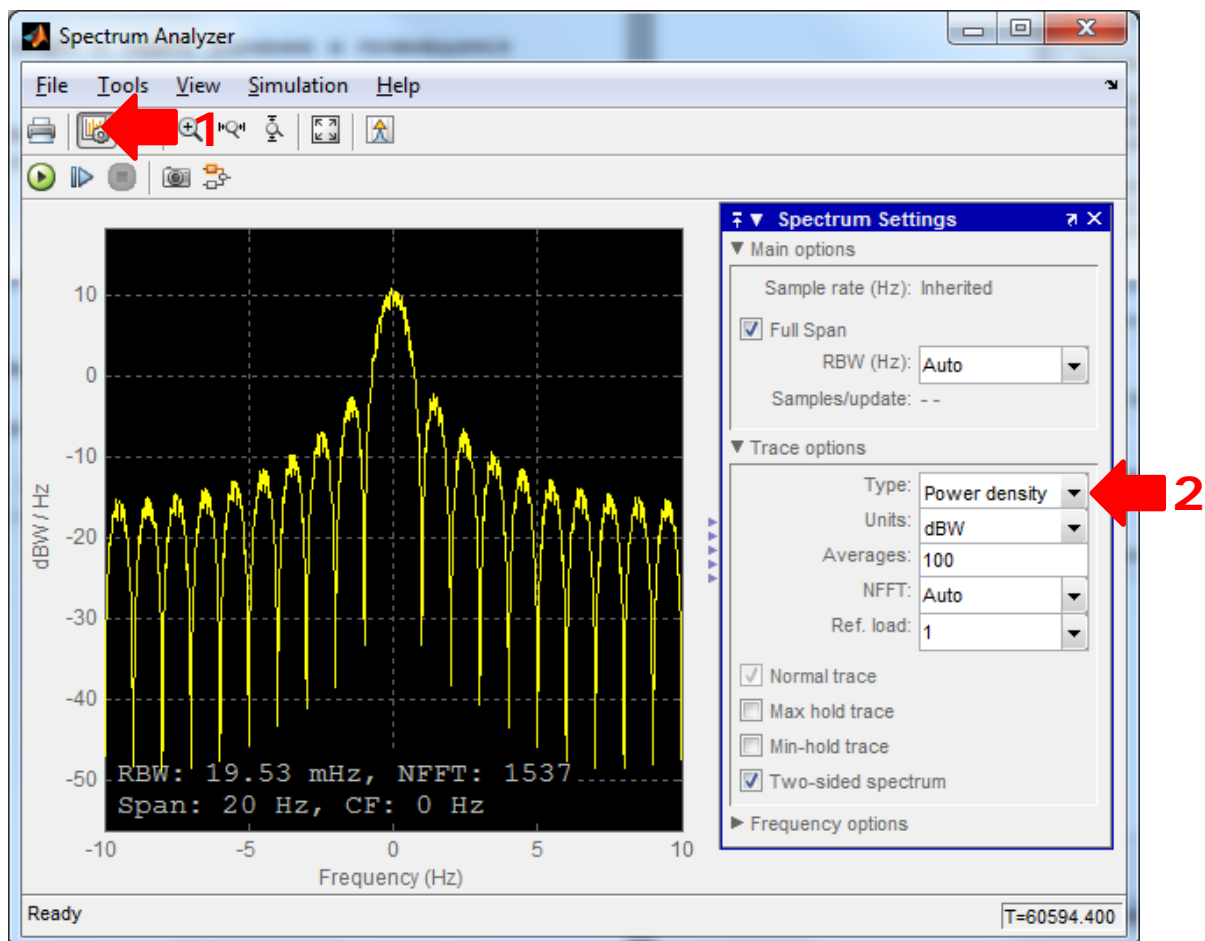
Открыть меню настроек, нажав пиктограмму .

В появившемся слева меню настроек развернуть подменю **Trace options**.

В раскрывающемся списке **Type** выбрать **Power density**.

В раскрывающемся списке **Units** выбрать **dBW**.

Установить значение **Averages** = 100.

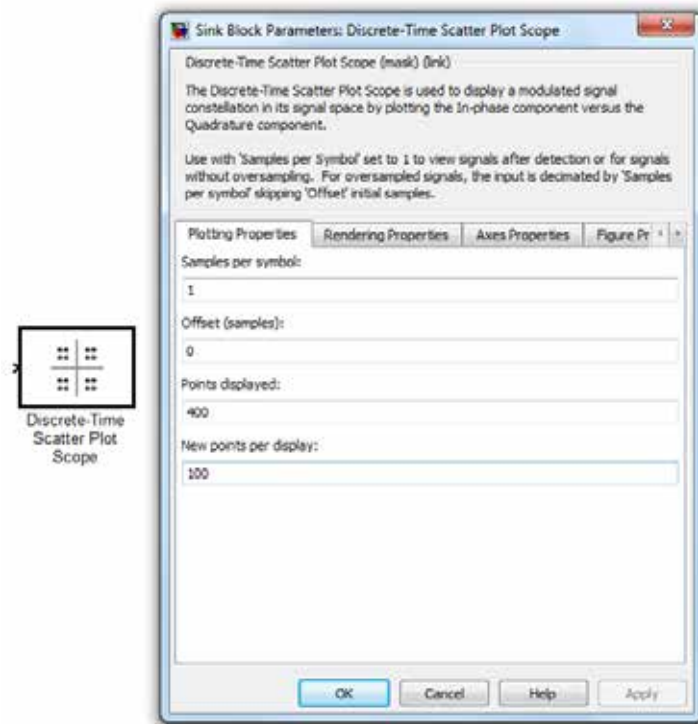


13. Настроить блок отображения дискретной векторной диаграммы («звездной» диаграммы) сигнала:

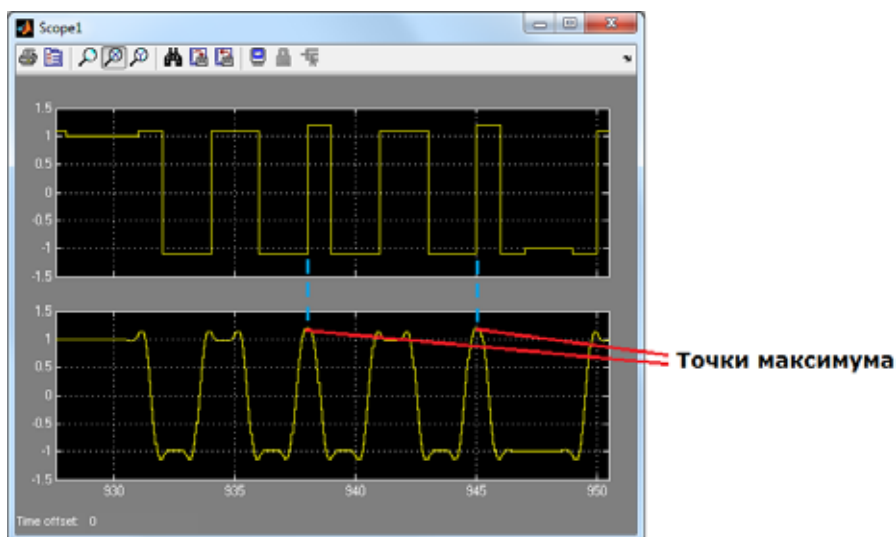
Количество выборок на символ **Samples per symbol** = 1.

Количество отображаемых точек на диаграмме **Points displayed** = 400.

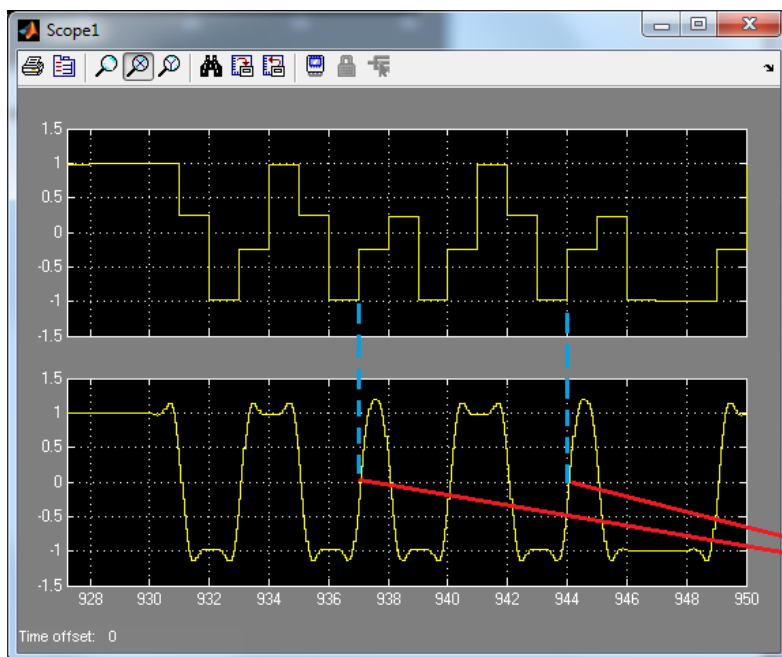
Параметр **New points per display** = 100. Чем больше данный параметр, тем быстрее идет симуляция, так как меньше времени тратится на отображение новых точек.



14. После того как все блоки модели были настроены, для корректной работы модели необходимо настроить начальный сдвиг времени в устройстве выборки. Для этого ненадолго запускается симуляция модели и останавливается. После чего открывается осциллограф Scope1 и анализируется осциллограмма. Момент выборки символа (верхняя осциллограмма) должен точно совпадать с максимумом сигнала (нижняя осциллограмма). В случае если момент выборки не попадает в максимум сигнала, необходимо задать другое значение задержки Delay (от 0 до 19) в устройстве выборки.



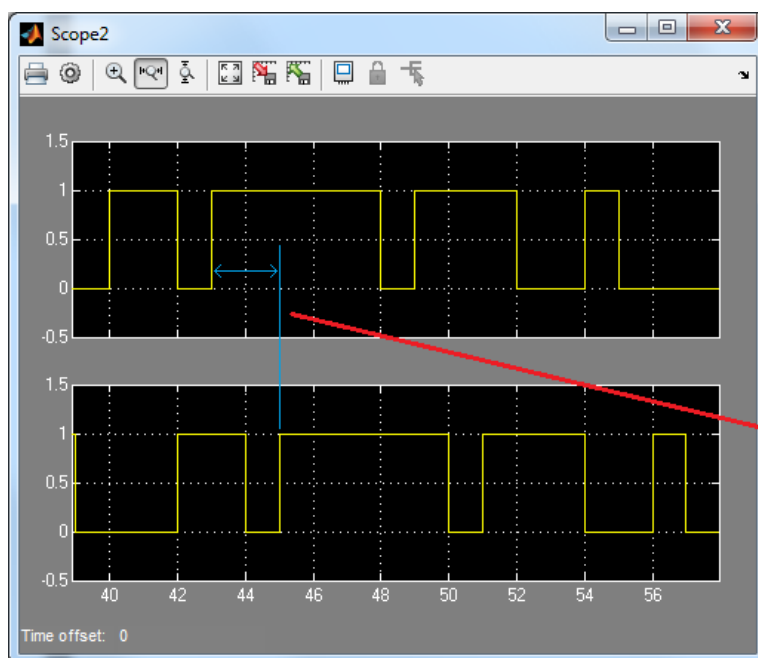
Пример корректной настройки



Не попадает
в максимум

Пример некорректной настройки

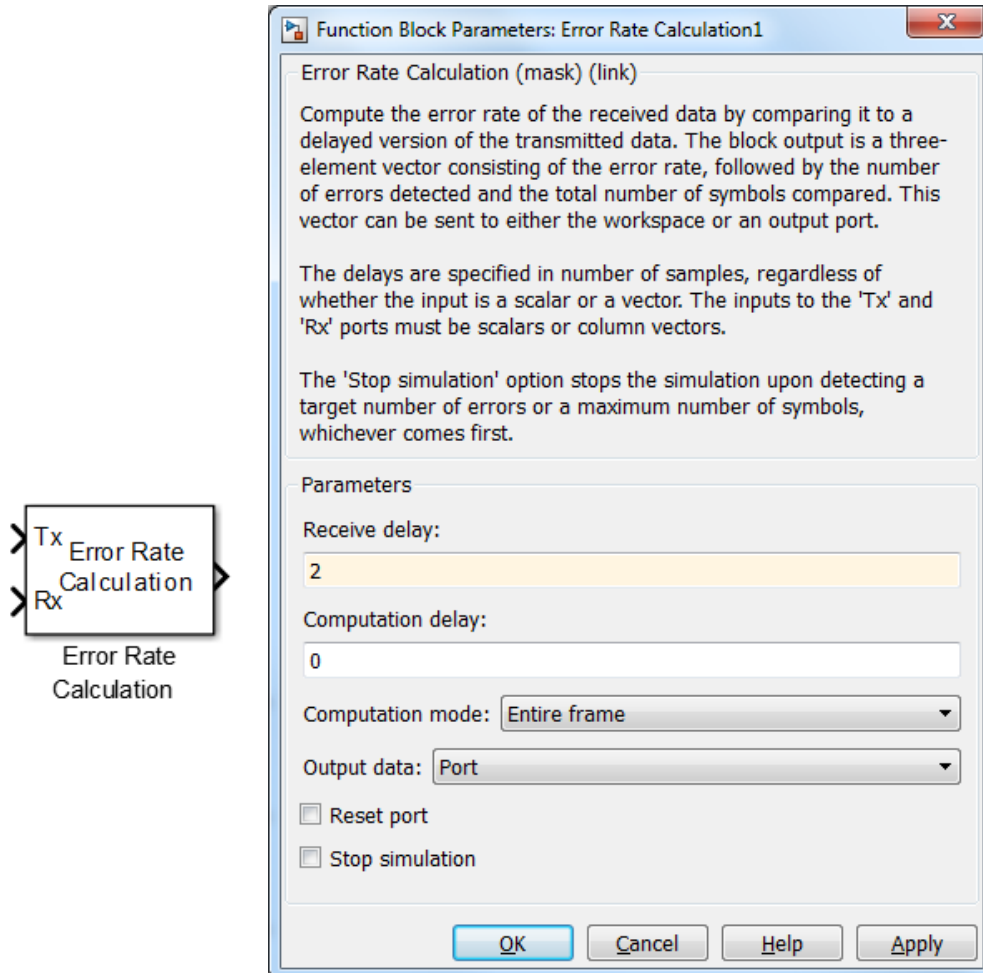
15. Определить, на сколько символов задержан сигнал на выходе приемника относительно сигнала с передающего устройства. Для этого необходимо запустить моделирование и открыть осциллограф *Scope2*. Выбрать участок осциллограммы и визуально определить, на сколько символов осциллограммы сдвинуты относительно друг друга.



Задержка 2 символа

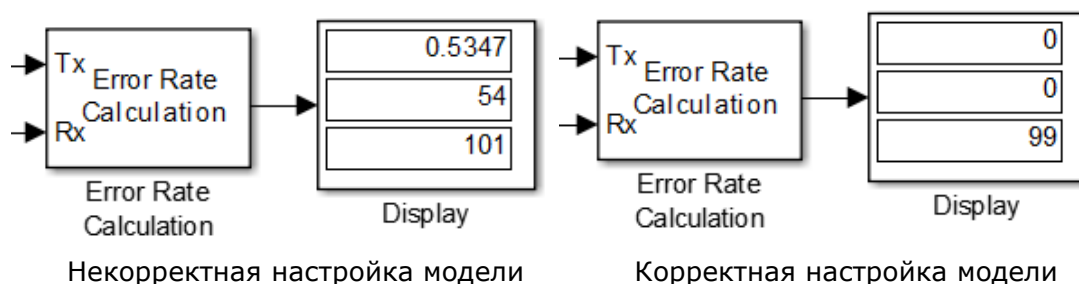
Пример определения задержки сигнала на выходе приемника
относительно сигнала с передатчика

16. Установить в блоке *Error Rate Calculation* параметр **Receive delay**, равный величине задержки сигнала на выходе приемника относительно передающего устройства, определенной на предыдущем шаге.



17. Запустить моделирование и проконтролировать количество ошибочно принятых символов. Если количество ошибок не равно нулю, то параметр **Receive delay** блока *Error Rate Calculation* установлен некорректно и следует его уточнить.

Если количество ошибок равно нулю, то модель считается настроенной.



Ход выполнения моделирования

1. Построить спектры и «звездную» диаграмму.

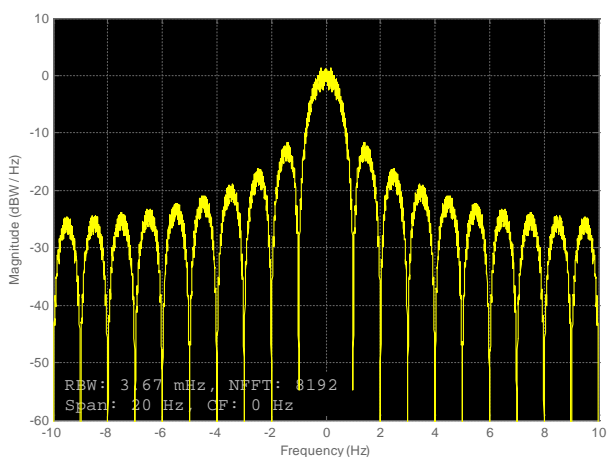
§ Изменить бесконечное время симуляции, записав в качестве значения **inf**.

§ Установить параметр **Eb/No** = 15 дБ в блоке *AWGN Channel*.

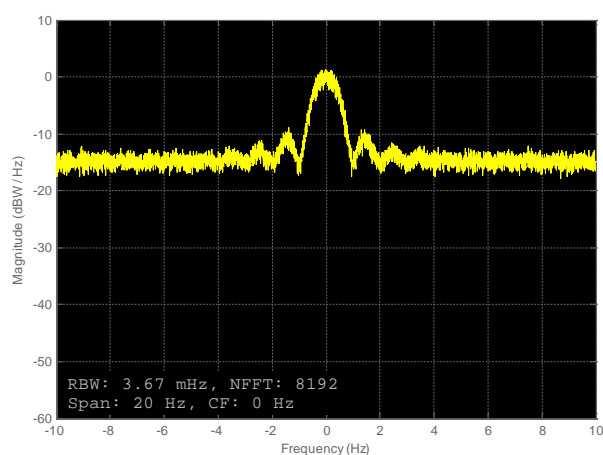
§ Запустить симуляцию и выждать время, в течение которого будет произведено усреднение спектров, после чего симуляцию можно остановить.

§ Сохранить полученные спектры через меню *File -> Print to Figure*. В открывшемся окне *Figure* выбрать *File -> Save As* и выбрать формат *.jpg* или *.png*.

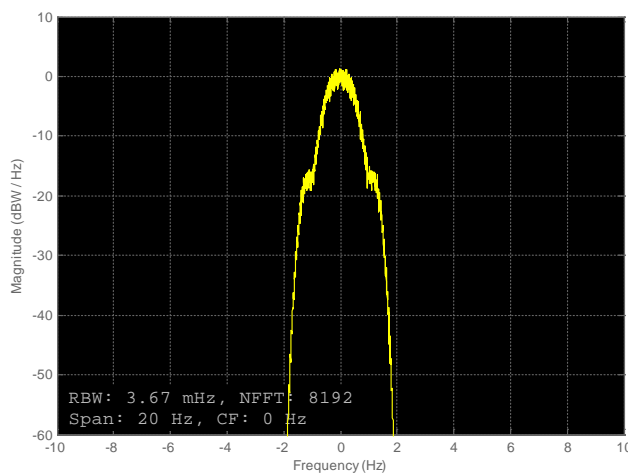
§ Сделать скриншот окна «звездной» диаграммы через комбинацию клавиш **Alt + Print Screen**.



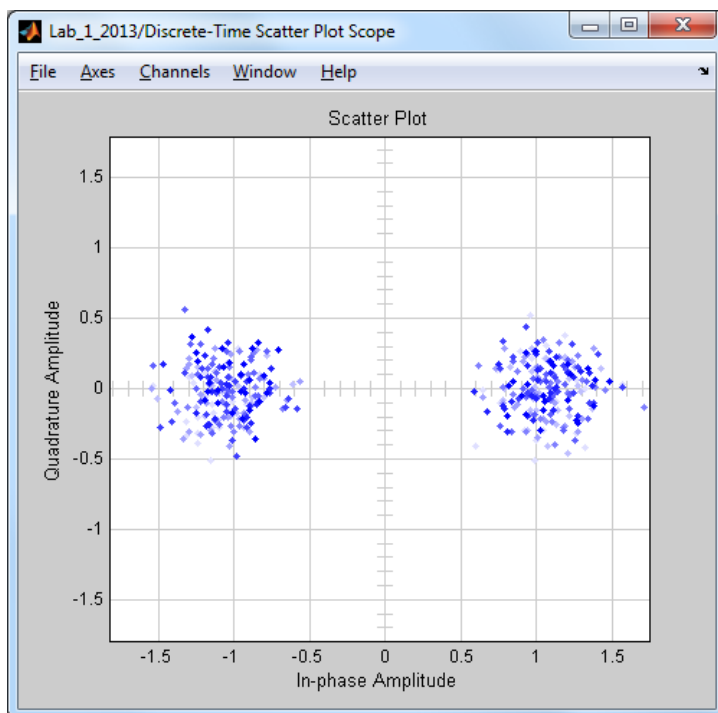
Спектр сигнала
на выходе передающего устройства



Спектр сигнала
на входе приемного устройства



Спектр сигнала после приемного фильтра



Пример «звездной» диаграммы

2. Определить зависимость вероятности битовой ошибки P_b от отношения E_b/N_0 и сравнить с идеальной кривой.

§ Установить значение E_b/N_0 в блоке *AWGN Channel* согласно значениям из табл. 1.

§ Запустить симуляцию и выждать, когда количество *ошибочно* принятых бит превысит 100. Остановить симуляцию и записать измеренные значения.

Таблица 1

Результаты моделирования

Отношение энергии бита к спектральной плотности мощности шума E_b/N_0 , дБ	Значения вероятности битовой ошибки P_b при оптимальном приеме	Измеренные значения вероятности битовой ошибки P_b
0	0.07865	
2	0.03751	
4	0.01250	
6	0.00239	
8	0.00019	
10	3.87211e-06	
12	9.00601e-09	

§ По полученным данным построить графики зависимости вероятности битовой ошибки P_b от отношения энергии бита к спектральной плотности мощности шума E_b/N_0 .

Пример построения графика:

```
% заполнение массивов вероятностей битовой ошибки
```

```
BER1 = [0.07865 0.03751 0.01250 0.00239 0.00019 3.87211e-06 9.00601e-09];
```

```
BER2 = [0.08865 0.04751 0.02250 0.00839 0.0010 5.87211e-05 1.00601e-06];
```

```
% заполнение массива отношения  $E_b/N_0$ 
```

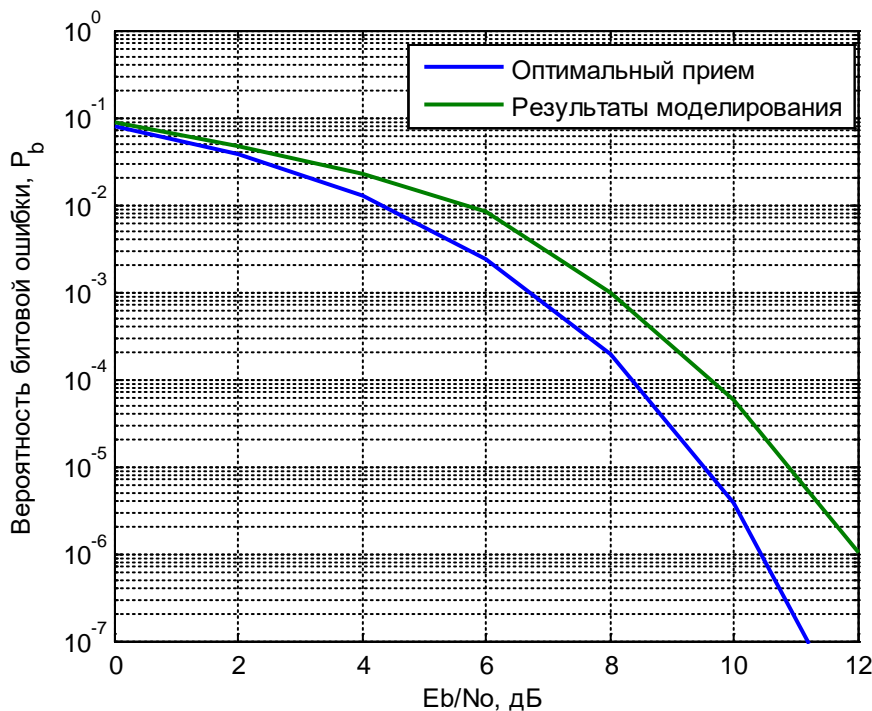
```
EbNo = [0 2 4 6 8 10 12];
```

```
% построение графика с логарифмическим масштабом по оси Y
```

```
semilogy(EbNo, BER1, EbNo, BER2);
```

```
% включение сетки
```

```
grid on;
```



Пример построения графика зависимости P_b от E_b/N_0

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

Моделирование РТСПИ с квадратурной амплитудной модуляцией 16-КАМ

Задания

1. Собрать и настроить модель РТСПИ согласно рис. 2.
2. Построить спектр сигнала на выходе передающего устройства.
3. Построить векторную («звездную») диаграмму сигнала.
4. Определить зависимость вероятности символьной ошибки от отношения E_s/N_0 и сравнить с идеальной кривой.
5. Сравнить спектрограммы сигналов 16-КАМ и 2-ФМн (спектрограммы сигналов 2-ФМн получены в лаб. работе № 1).
6. Сравнить кривые зависимости P_b для 16-КАМ и 2-ФМн.

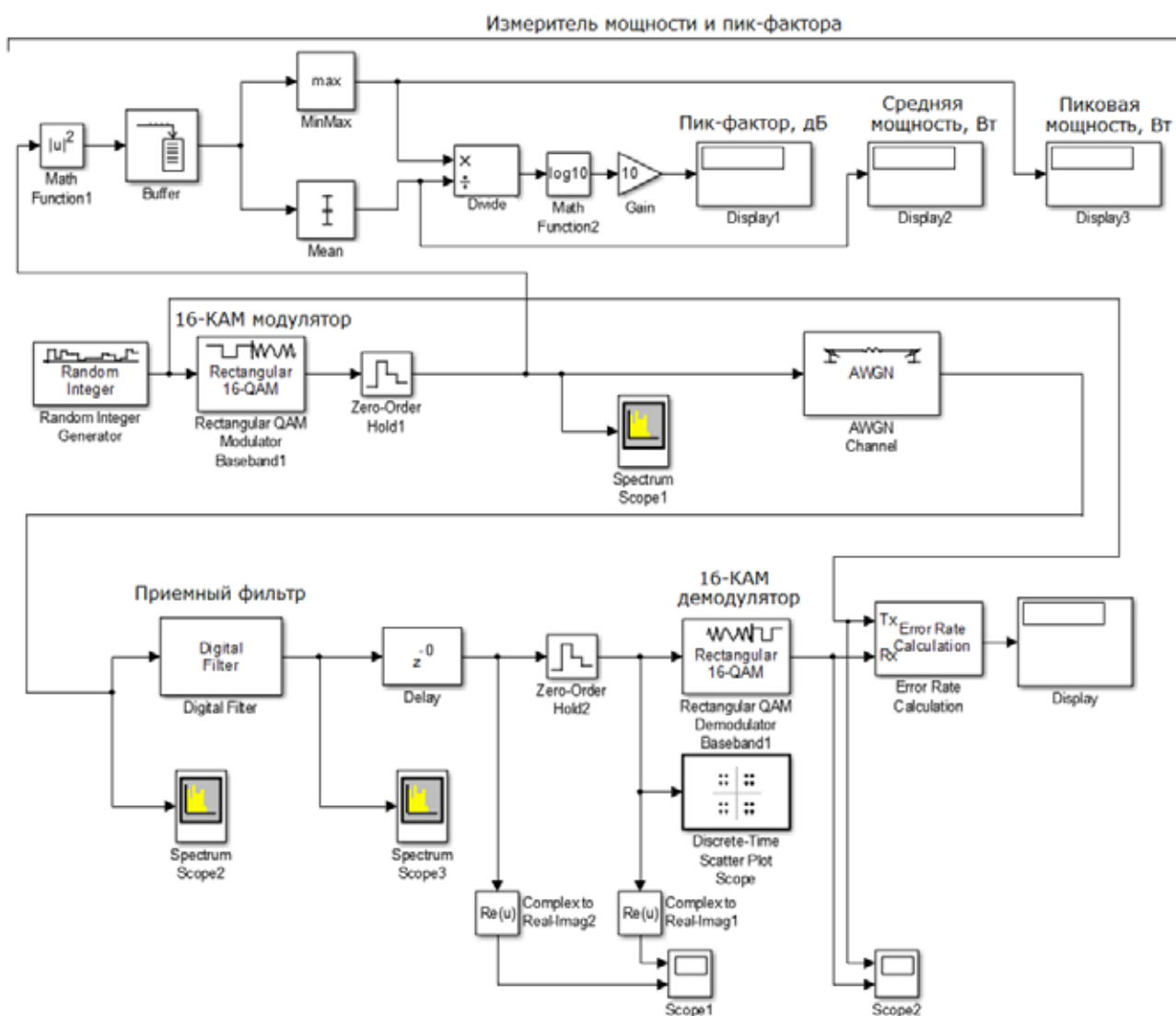


Рис. 2. Упрощенная модель РТСПИ

Варианты

Вариант	1	2	3	4	5	6	7
Битовая скорость, бит/с	2400	4800	9600	14400	19200	28800	33600
Вариант	8	9	10	11	12	13	14
Битовая скорость, бит/с	38400	76800	153600	200	400	800	1200

Краткое описание модели

Модель, представленная на рис. 2, имеет ту же структуру, что и модель на рис. 1 из лаб. работы № 1. Отличия заключаются в модуляторе, демодуляторе, приемном фильтре, а также добавленном измерителе мощности и пик-фактора.

Измеритель мощности вычисляет три параметра:

§ пиковую мощность – максимальное значение мощности, достигнутое в течение некоторого интервала времени T :

$$P_{max} = \max_{0 < t \leq T} \langle |u(t)|^2 \rangle;$$

§ среднюю мощность – среднее значение мощности за некоторый интервал времени T :

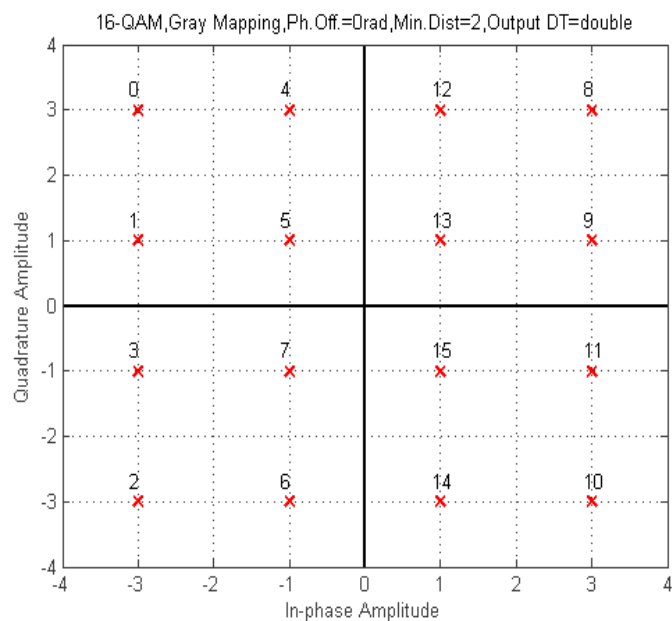
$$P_{cp} = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} |u(t)|^2 dt = \overline{|u(t)|^2};$$

§ пик-фактор – отношение пиковой мощности к средней мощности. Как правило, измеряется в децибелах:

$$\Pi = 10 \log_{10} \frac{P_{max}}{P_{cp}}.$$

16-КАМ модулятор преобразует цифровой сигнал в комплексный сигнал с квадратурной амплитудной модуляцией. 16-КАМ сигнал на выходе модулятора представлен в комплексной форме без несущей:

Символ	Комплексные значения сигнала, $Re + i \cdot Im$	Символ	Комплексные значения сигнала, $Re + i \cdot Im$
0	-3+3i	8	3+3i
1	-3+1i	9	3+1i
2	-3-3i	10	3-3i
3	-3-1i	11	3-1i
4	-1+3i	12	1+3i
5	-1+1i	13	1+1i
6	-1-3i	14	1-3i
7	-1-1i	15	1-1i



Настройка параметров модели

1. В блоке *Random Integer Generator* установить значение **M-ary number = 16**.

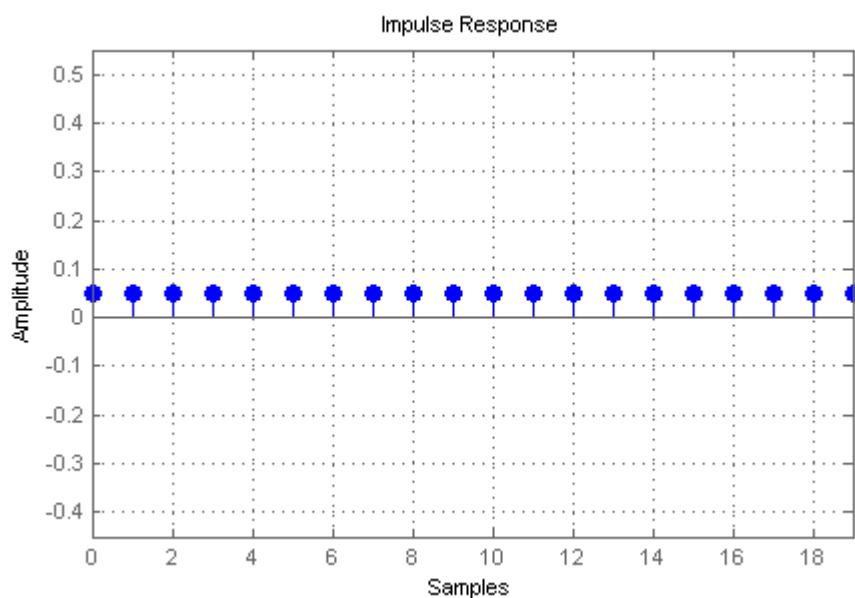
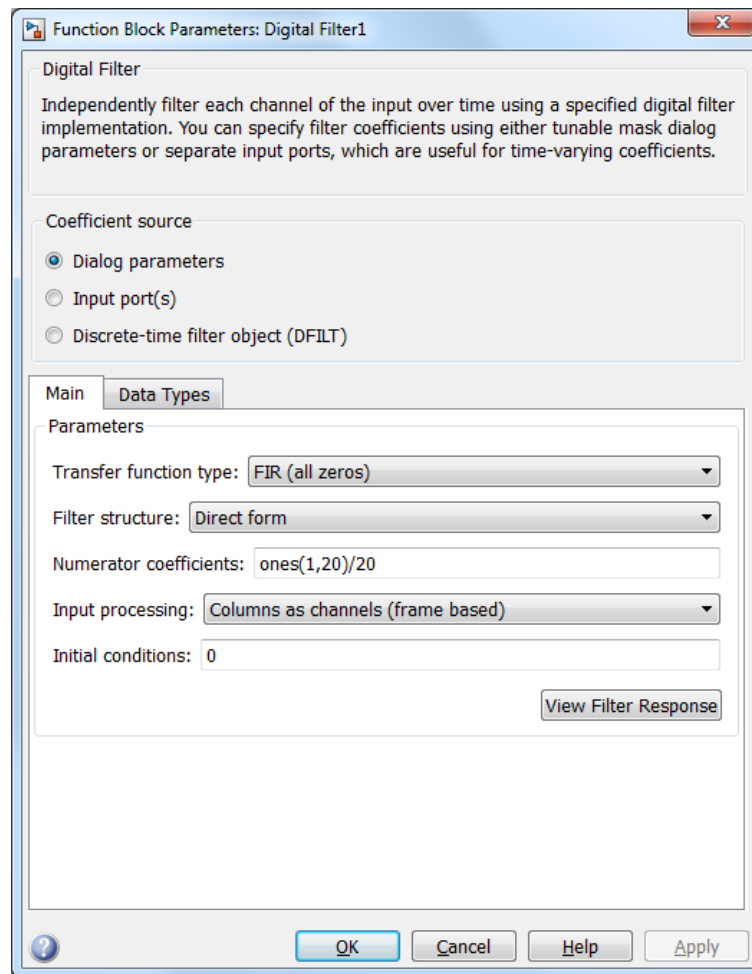
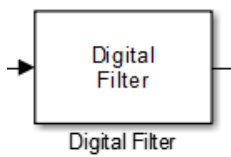
Установить параметр **Sample time = 1/символьная скорость**. Символьная скорость определяется как *битовая скорость/количество бит в символе*. Для 16-QAM в одном символе 4 бита.

Параметр **Initial seed** оставить по умолчанию.

2. Оставить настройки блока *Rectangular QAM Modulator Baseband* по умолчанию.
3. В блоке *Zero-Order Hold1* установить параметр **Sample time = 1/(20 * символьная скорость)**, тем самым повышая частоту дискретизации в 20 раз.
4. В блоке *Digital Filter* в раскрывающемся списке **Transfer function type** выбрать **FIR (all zeros)**.

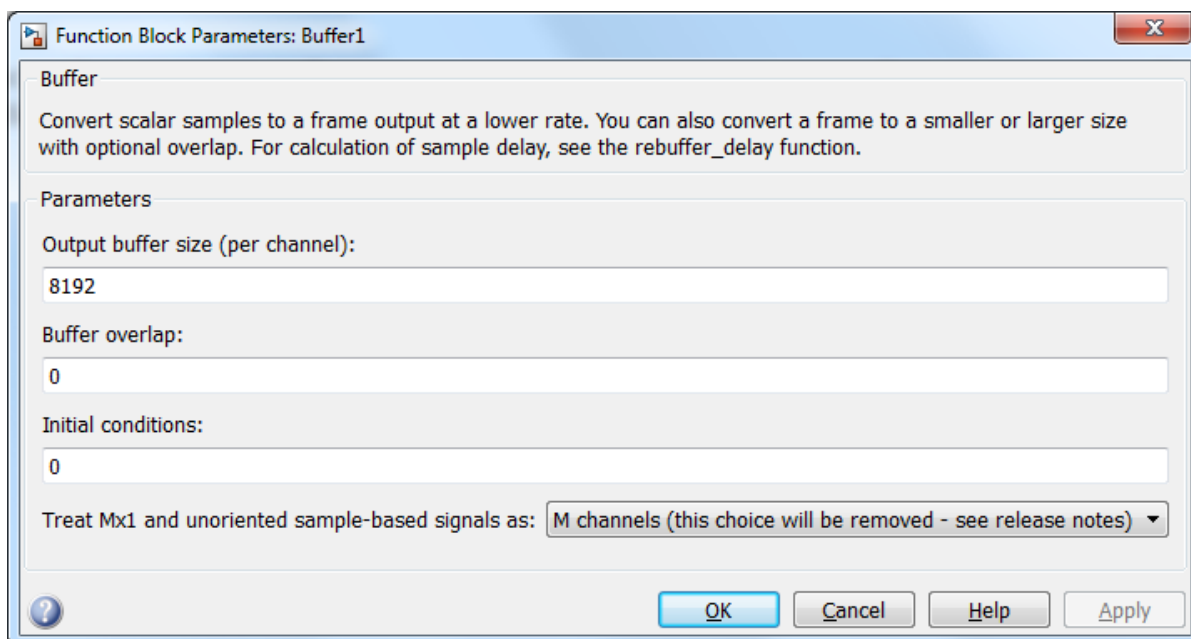
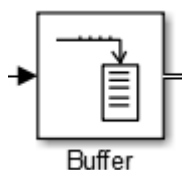
В поле **Numeration coefficients** задать выражение **ones(1,20)/20**.

Функция $ones(n,m)$ задает матрицу единиц размера $n \times m$. Запись $ones(1,20)/20$ задает импульсную характеристику фильтра в виде прямоугольного импульса.



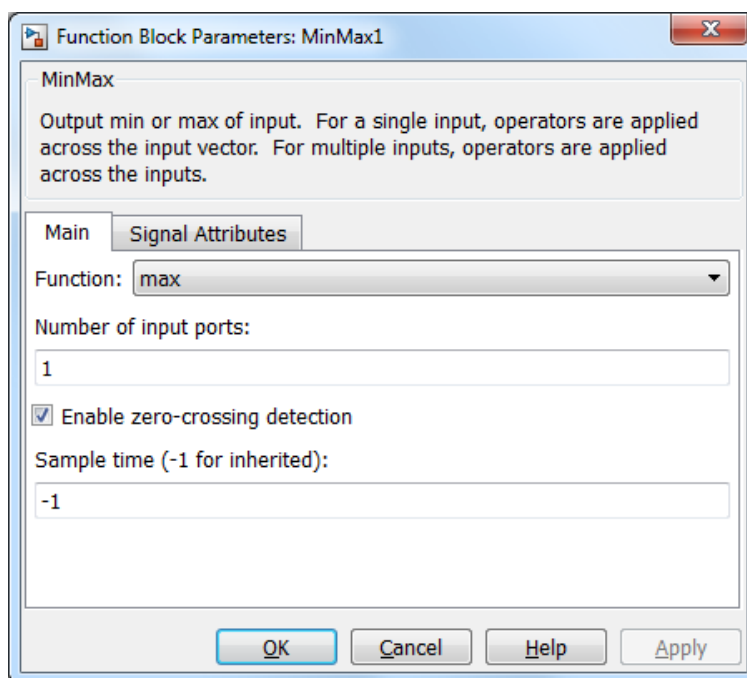
Данный фильтр является согласованным для ФМн и КАМ сигналов без сглаживания, т. е. символы которых представлены прямоугольными импульсами.

5. В блоке задержки *Delay* установить количество задерживаемых отчетов **Delay = 0**. Данная настройка предварительная, впоследствии она будет откорректирована.
Остальные параметры блока *Delay* оставить по умолчанию.
6. В блоке *Zero-Order Hold2*, являющемся частью устройства выборки, установить параметр **Sample time = 1/символьная скорость**.
7. Настройки блока *Rectangular QAM Demodulator Baseband* оставить по умолчанию.
8. В блоке *Error Rate Calculation* в раскрывающемся меню *Output data* выбрать пункт *Port*.
9. В блоке *Buffer* установить параметр **Output buffer size = 8192**. Данное число задает количество выборок, по которым происходит вычисление средней и пиковой мощности сигнала. Чем больше значение параметра, тем более точные результаты вычисления мощностей.



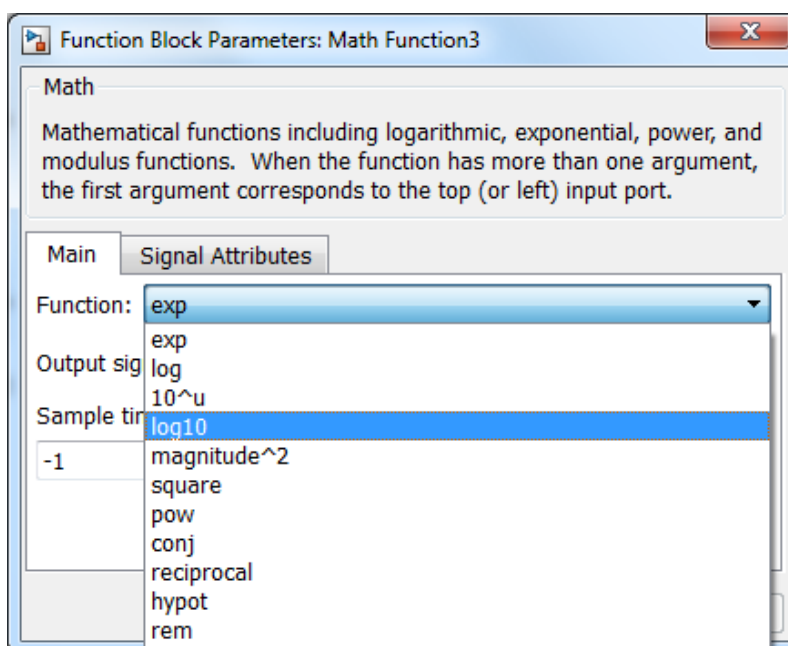
10. В блоке *MinMax* в раскрывающемся списке **Function** выбрать **max**.
Остальные параметры оставить по умолчанию.

Данный блок определяет максимальное или минимальное значение сигнала, представленного в виде массива выборок.



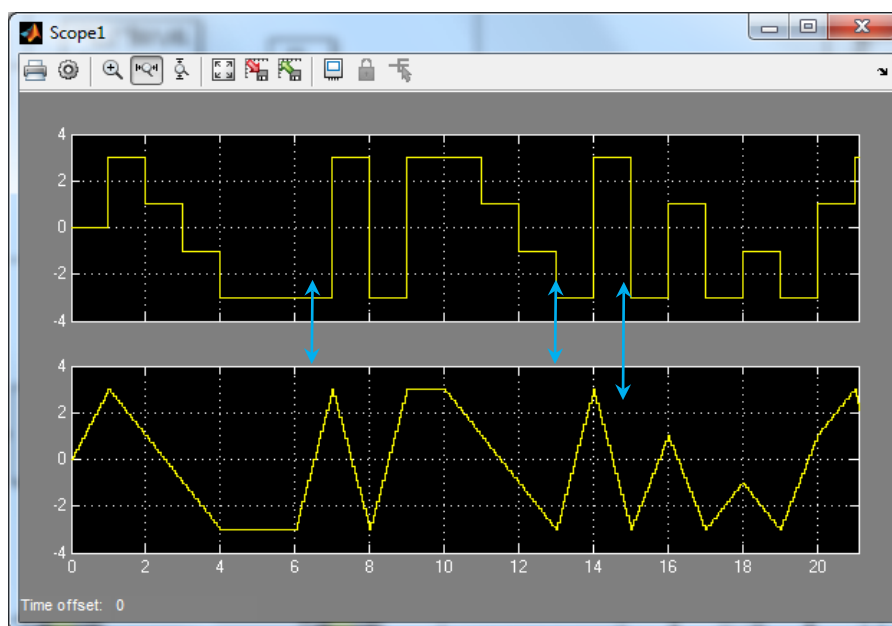
11. В блоке *Math Function1* в раскрывающемся списке **Function** выбрать **magnitude²**.

12. В блоке *Math Function2* в раскрывающемся списке **Function** выбрать **log10**.

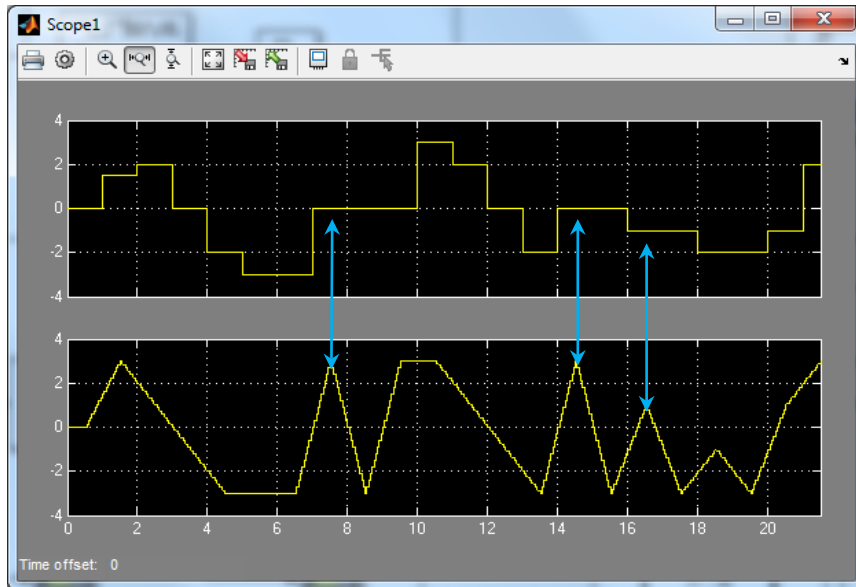


13. Запустить моделирование и определить среднюю мощность сигнала.
14. В блоке AWGN Chanel задать параметр $E_s/N_0 = 100$ дБ, определяющий сигнал/шум.

Параметр **Input signal power** задать равным **измеренной величине средней мощности**.
Установить параметр **Symbol period = 1/символьная скорость**.
15. Настройку остальных блоков произвести аналогично настройке из предыдущей лаб. работы.
16. После настройки всех блоков необходимо настроить начальный сдвиг времени в устройстве выборки аналогично процедуре настройки из предыдущей лаб. работы. Для этого запускается симуляция модели и останавливается, после чего открывается осциллограф Scope1 и анализируется осциллограмма. Момент выборки символа (верхняя осциллограмма) должен точно совпадать с максимумом сигнала (нижняя осциллограмма). В случае если момент выборки не попадает в максимум сигнала, необходимо задать другое значение задержки Delay (от 0 до 19) в устройстве выборки.

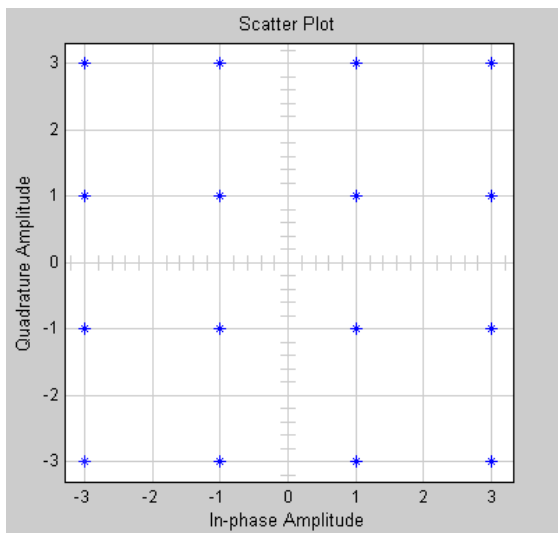


Пример **корректной** настройки – максимумы символа на входе совпадают с моментом фиксации сигнала на выходе

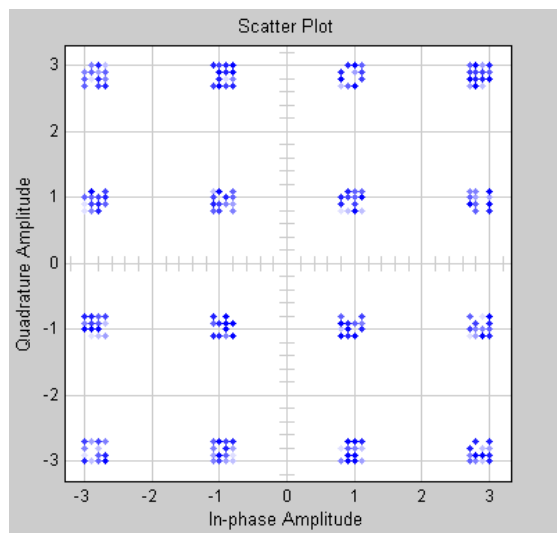


Пример **некорректной** настройки – максимумы символа на входе не совпадают с моментом фиксации сигнала на выходе

17. Проконтролировать корректность настройки по «звездной» диаграмме. В случае если диаграмма не собирается в точки, откорректировать задержку Delay.

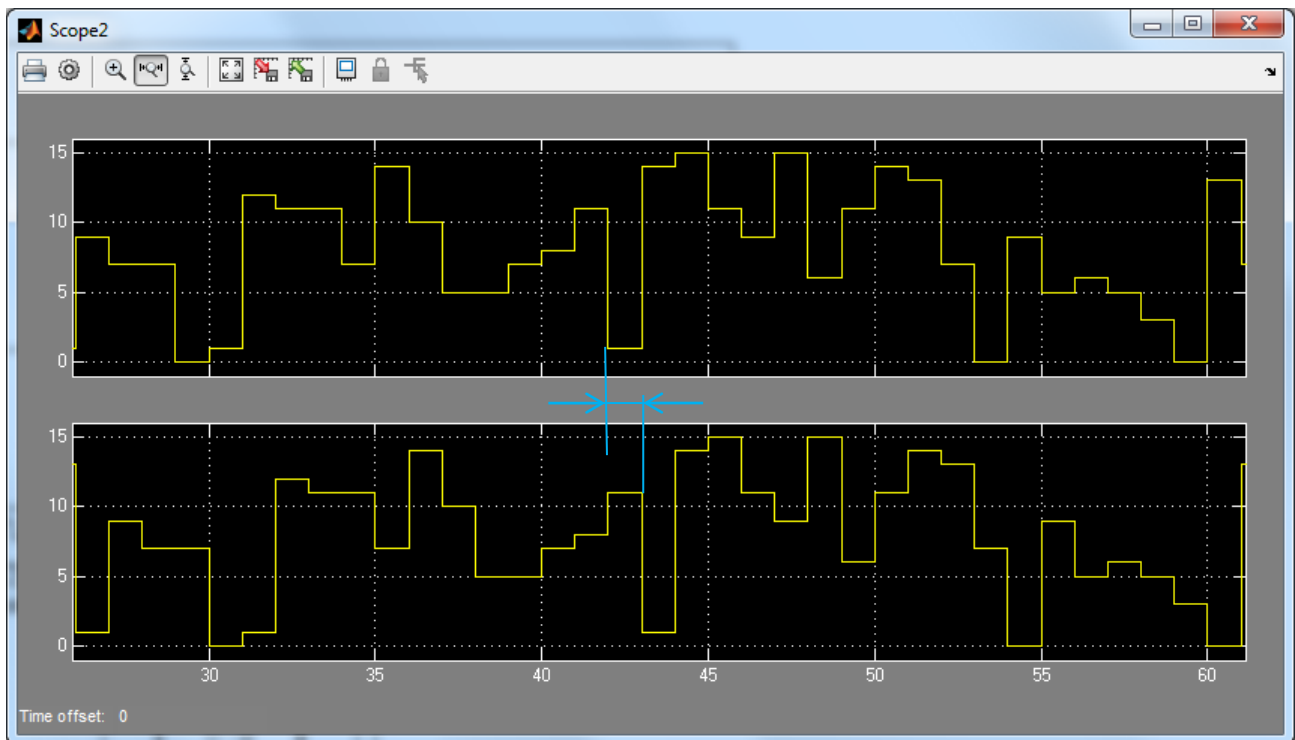


Результат **корректной** настройки устройства выборки



Результат **некорректной** настройки устройства выборки

18. Определить, на сколько символов задержан сигнал на выходе приемника относительно сигнала с передающего устройства. Для этого необходимо запустить моделирование и открыть осциллограф Scope2. Выбрать участок осциллограммы и визуально определить, на сколько символов осциллограммы сдвинуты относительно друг друга.

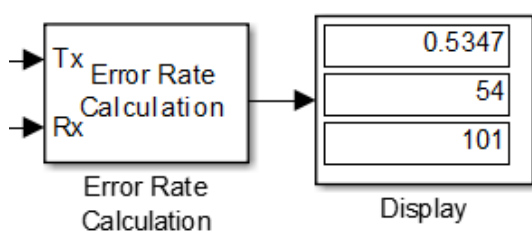


Пример определения задержки сигнала на выходе приемника. Задержка 1 символ

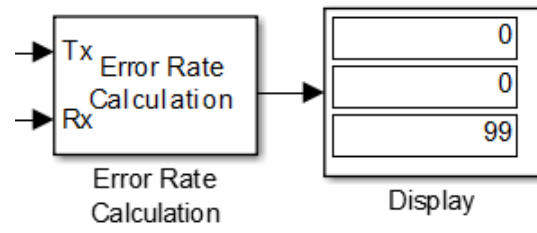
19. Установить в блоке Error Rate Calculation параметр Receive delay, равный величине задержки сигнала на выходе приемника относительно передающего устройства, определенной на предыдущем шаге.

20. Запустить моделирование и проконтролировать количество ошибочно принятых символов. Если количество ошибок не равно нулю, то параметр Receive delay блока Error Rate Calculation установлен некорректно и следует его уточнить.

Если количество ошибок равно нулю, то модель считается настроенной.



Некорректная настройка модели



Корректная настройка модели

Ход выполнения моделирования

1. Определить среднюю мощность, пиковую мощность и пик-фактор сигнала.
2. Построить спектры и «звездную» диаграмму.
 - § Установить бесконечное время симуляции, записав в качестве значения **inf**.
 - § Установить параметр **Es/No** = 15 дБ в блоке *AWGN Channel*.
 - § Запустить симуляцию и выждать время, в течение которого будет произведено усреднение спектров, после чего симуляцию можно остановить.
 - § Сохранить полученные спектры через меню *File* -> *Print to Figure*. В открывшемся окне *Figure* выбрать *File* -> *Save As* и выбрать формат .jpg или .png.
 - § Сделать скриншот окна «звездной» диаграммы через комбинацию клавиш Alt + Print Screen.
3. Сравнить спектр сигнала 16-КАМ и спектр 2-ФМн, полученный в лаб. работе № 1.
4. Определить зависимость вероятности битовой ошибки P_b от отношения E_b/N_0 , используя скрипт, и сравнить с идеальной кривой.
 - § В блоке *AWGN Channel* в поле **Es/No (dB)** в качестве значения установить переменную E_sN_0 .
 - § В блоке *Error Rate Calculation* в раскрывающемся меню **Output data** выбрать **Workspace**.

В поле **Variable name** в качестве значения задать переменную **ErrorVec**.

Установить галочку **Stop Simulation**.

- § Используя приведенный ниже скрипт, построить зависимость вероятности битовой ошибки P_b в автоматическом режиме. Перед запуском скрипта строку '`name_of_model`' необходимо заменить на имя вашей модели Simulink, например «`sim('my_model_lab_3')`».

Примечание. Для ускорения процесса моделирования рекомендуется удалить все блоки с графическим отображением информации (*Scope, Spectrum Analyzer, Discrete-Time Scatter Plot Scope, Display*), предварительно сохранив модель под другим именем.

Скрипт для определения зависимости вероятности битовой ошибки необходимо скопировать в m-файл. Для этого в основном окне Matlab необходимо создать m-файл, нажав в левом верхнем углу пиктограмму «New Script», либо через меню New - > Script.

Перед запуском скрипта его необходимо сохранить в каталог, где хранится ваша модель, собранная в Simulink.

Запуск скрипта осуществляется нажатием клавиши «F5».

Примечание. Имя сохраняемого m-файла должно быть написано английскими буквами и не должно совпадать с именем модели, начинаться с цифры и содержать пробелы, а также не должно совпадать со служебными зарезервированными словами Matlab, например с названиями встроенных функций.

Рекомендуемое название - «Lab_3_<фамилия латиницей>.m», например «Lab_3_petrov.m»

Скрипт для определения зависимости вероятности битовой ошибки

```
clear Ps % Удаление переменных, если они ранее уже были
clear E %

k = 4; % Количество бит на символ

EsNo = 6; % Задание начального значения EsNo
i=1;

while EsNo <= 18 % Начало цикла. Задание условия остановки
    sim('name_of_model'); % Необходимо указать имя модели
    SER1(i) = ErrorVec(1); % Сохранение текущей вероятности ошибки
    EsNo1(i) = EsNo; % Сохранение текущего EsNo
    EsNo = EsNo + 2 % Увеличение EsNo для последующего моделирования
    i = i+1;
end
```

```
% Значения идеальной кривой
ebno0 = [0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14];

ber0 = [0.14098 0.11810 0.09774 0.07745 0.05862 0.04189 0.02787 ...
        0.01697 9.24721e-3 4.39034e-3 1.75415e-3 5.64706e-4 ...
        1.38659e-4 2.42338e-05 2.76321e-06];

% Преобразование EsNo в EbNo
EbNo = EsNo1 - 10*log10(k);
% Перерасчет вероятности символьной ошибки в вероятность битовой ошибки
BER = SER1/k;

% Построение графика
semilogy(EbNo, BER, ebno0, ber0, 'LineWidth', 2);
grid on % Включение сетки
```

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

Моделирование РТСПИ с 4-ФМн и петлей ФАПЧ

Задания

1. Собрать и настроить модель РТСПИ согласно рис. 3.
2. Построить спектр сигнала на выходе передающего устройства.
3. Построить векторную, «звездную» и глазковую диаграммы сигнала.
4. Построить осциллограммы сигналов в контрольных точках петли ФАПЧ.
5. Определить полосу захвата петли фазовой автоподстройки.
6. Сравнить спектрограммы сигналов 4-ФМн и 2-ФМн (спектрограммы сигналов 2-ФМн получены в лаб. работе № 1).

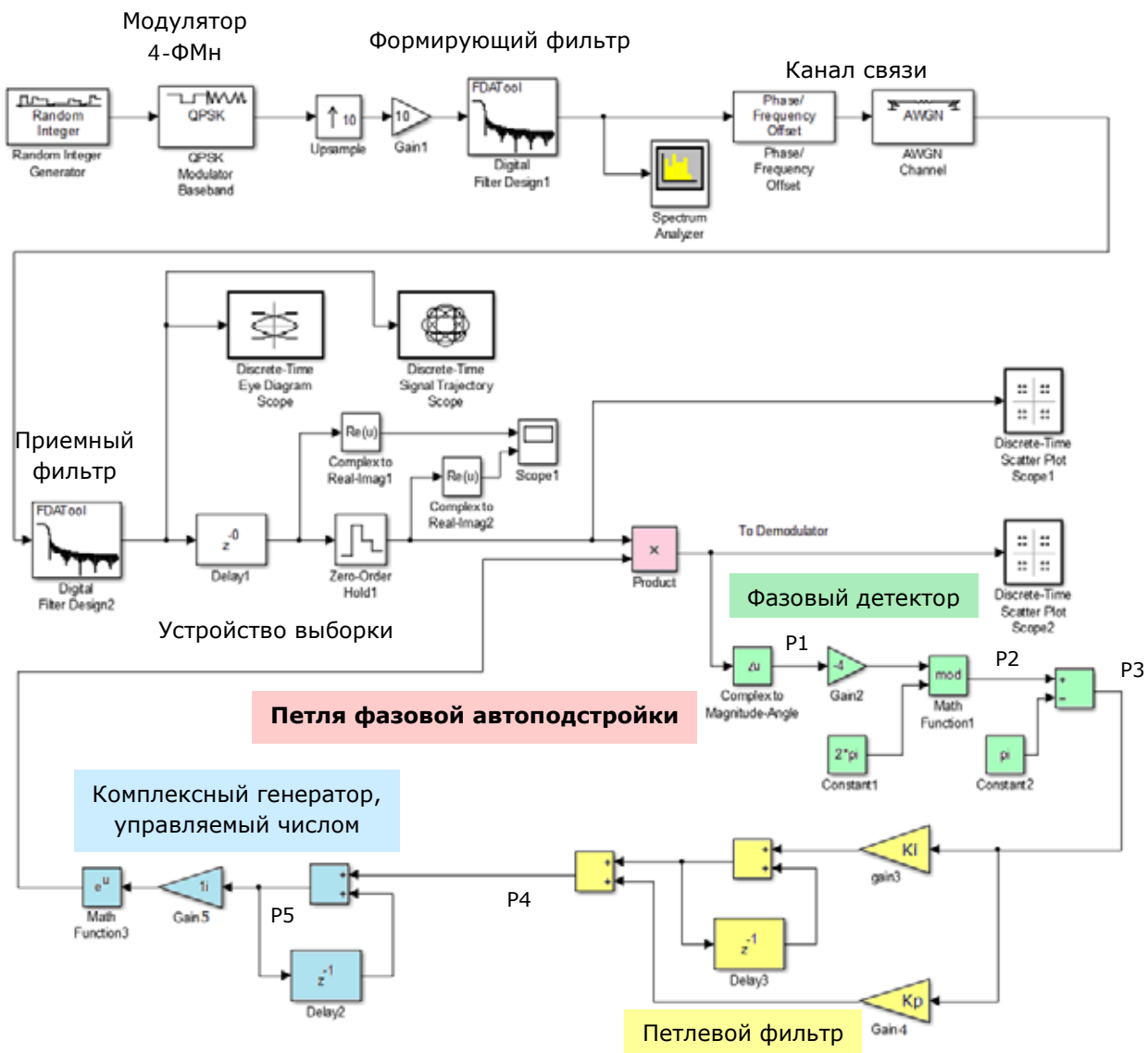


Рис. 3. Упрощенная модель РТСПИ с петлей ФАПЧ

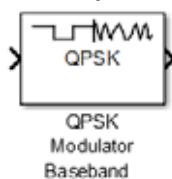
Варианты

Вариант	1	2	3	4	5	6	7
Битовая скорость, бит/с	1200	2400	4800	7200	9600	14400	16800
Коэффициент сглаживания фильтра β	0.35	0.5	0.75	1	0.35	0.5	0.75
Интегральный коэффициент K_i	4e-4	1e-4	5e-4	1e-4	5e-5	4e-4	1e-4
Пропорц. коэффициент K_p	0.01	0.05	0.02	0.01	5e-3	0.01	0.05
Вариант	8	9	10	11	12	13	14
Битовая скорость, бит/с	19200	38400	76800	100	200	400	600
Коэффициент сглаживания фильтра β	0.35	0.5	0.75	1	0.35	0.5	0.75
Интегральный коэффициент K_i	1e-4	5e-4	1e-4	5e-5	1e-3	5e-4	5e-5
Пропорц. коэффициент K_p	0.05	0.02	0.01	5e-3	0.05	0.02	5e-3

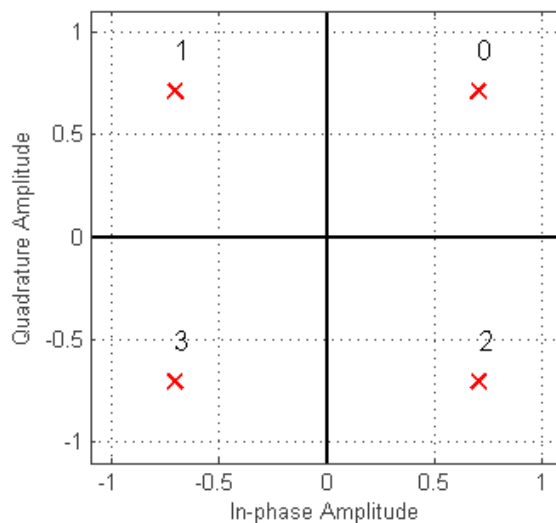
Краткое описание модели

Модель, представленная на рис. 3, имеет ту же структуру, что и модель на рис. 1 из лаб. работы № 1. Отличия заключаются в модуляторе и демодуляторе, формирующем и приемном фильтрах, а также в добавленной блоке частотного сдвига в канале связи и узле петли фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ).

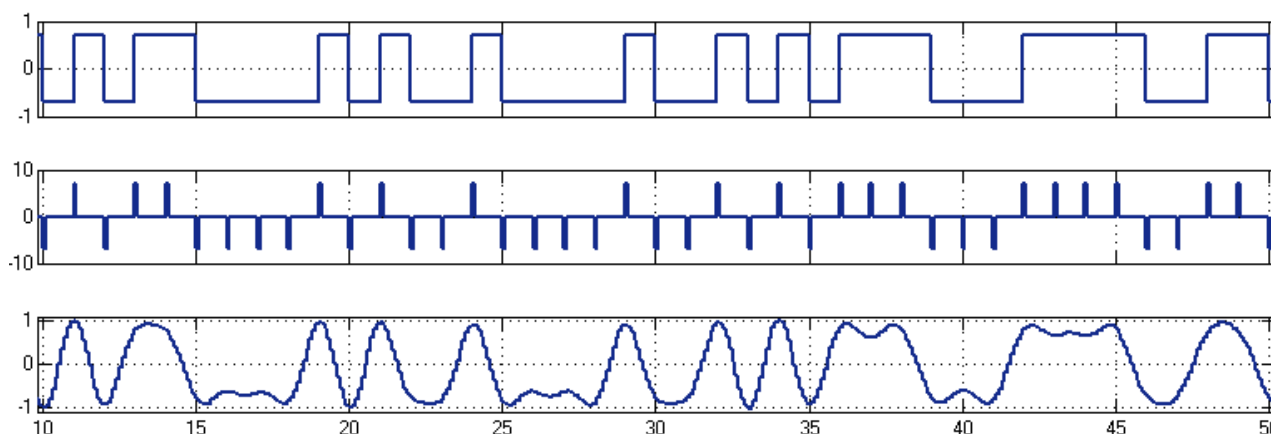
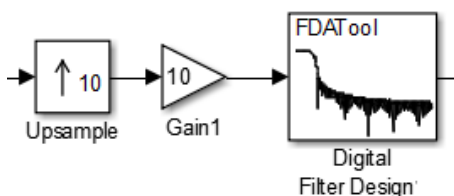
4-ФМн модулятор преобразует цифровой сигнал в комплексный сигнал с квадратурной модуляцией. 4-ФМн сигнал на выходе модулятора представлен в комплексной форме без несущей:



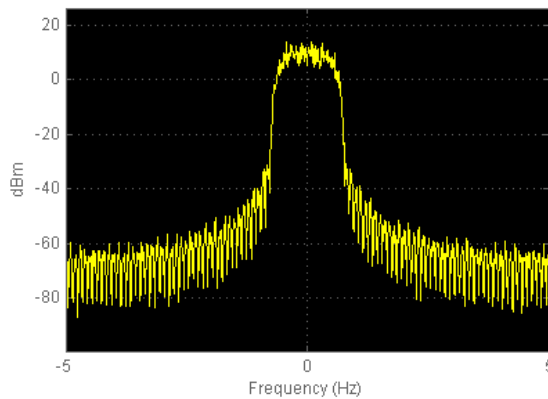
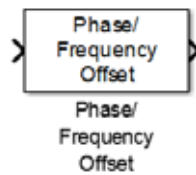
Символ	Комплексные значения сигнала, $Re + i \cdot Im$
0	$0.707 + i0.707$
1	$-0.707 + i0.707$
2	$0.707 - i0.707$
3	$-0.707 - i0.707$



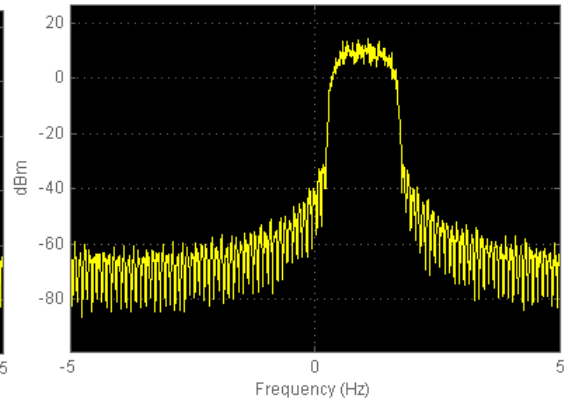
Сочетание блоков *Upsample* и *Gain* повышает частоту дискретизации и формирует импульсы длительностью в одну выборку – цифровой аналог дельта-импульса. Данные импульсы необходимы для корректного формирования сигнала с помощью формирующего фильтра. Отклик фильтра на единичный импульс должен повторять импульсную характеристику фильтра «корень из приподнятого косинуса».



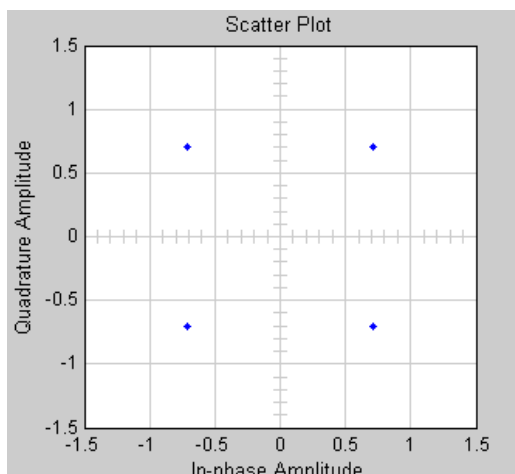
Блок *Phase/Frequency Offset* осуществляет сдвиг частоты, моделируя тем самым доплеровский сдвиг частоты либо сдвиг частоты, вызванный уходом частоты опорных генераторов приемного и передающего устройств.



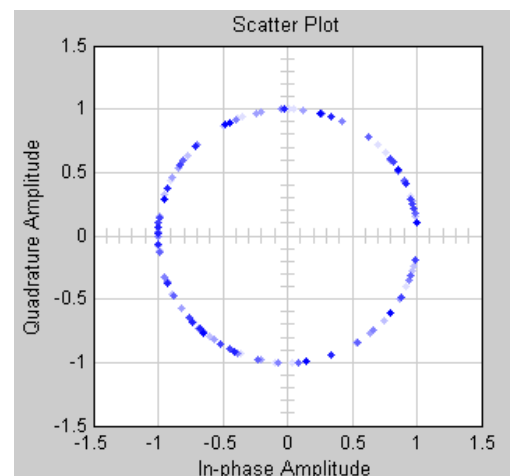
Спектр сигнала без сдвига частоты



Спектр сигнала со сдвигом частоты



Звездная диаграмма сигнала
без сдвига частоты



Звездная диаграмма сигнала
со сдвигом частоты

Приемный фильтр идентичен формирующему фильтру и имеет характеристику «корень из приподнятого косинуса». Данный приемный фильтр является согласованным, т. е. обеспечивает максимум отношения сигнал/шум на выходе и при этом дает нулевые межсимвольные искажения, так как тракт, включающий формирующий и приемный фильтры, имеет характеристику типа «приподнятый косинус».

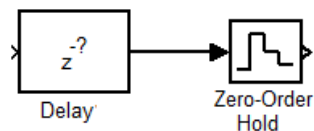
$$H_{RC}(f) = H_{TF}(f)H_{RF}(f),$$

где $H_{RC}(f)$ – общая частотная характеристика тракта, имеющая вид «приподнятый косинус» и обеспечивающая нулевые межсимвольные искажения;

$H_{TC}(f)$ – частотная характеристика формирующего фильтра, имеющая вид «корень из приподнятого косинуса»;

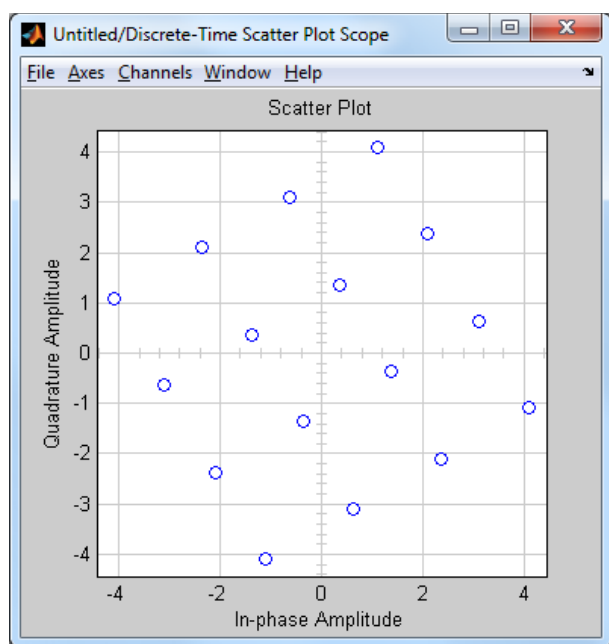
$H_{RC}(f)$ – частотная характеристика приемного фильтра, идентичная характеристике формирующего фильтра и имеющая вид «корень из приподнятого косинуса».

После фильтра сигнал поступает на устройство выборки, состоящее из блоков *Delay* и *Zero-Order Hold*. В реальном цифровом приемнике устройство выборки совмещено с устройством символьной синхронизации, задача которого заключается в отслеживании оптимального момента выборки сигнала.

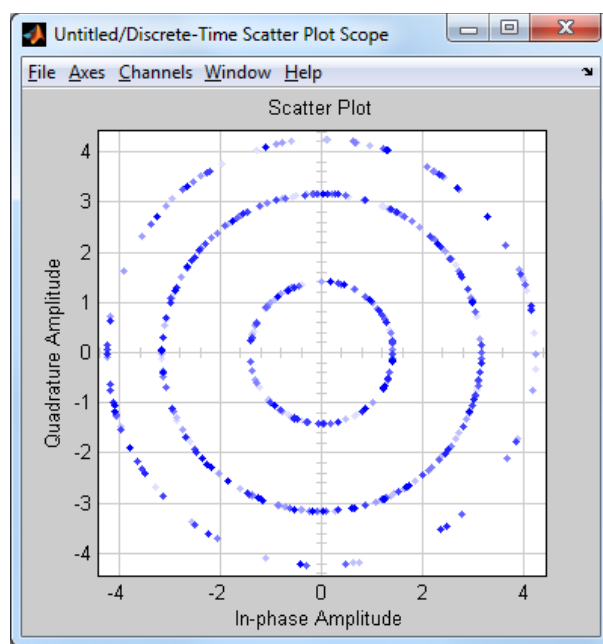


Устройство выборки

После устройства выборки следует петля фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), задача которой заключается в устранении фазовой и частотной ошибки, возникшей в канале связи из-за разности частот опорных генераторов передающего и приемного устройств. Фазовая ошибка приводит к повороту сигнального созвездия на фиксированный угол. Частотная ошибка приводит к постоянному вращению сигнального созвездия. В обоих случаях демодулятор не может корректно работать.



Фазовая ошибка 16-QAM сигнала



Частотная ошибка 16-QAM сигнала

Принятый сигнал определяется выражением:

$$\bar{s}(t) = A(t)e^{i\varphi(t)}e^{i\theta(t)},$$

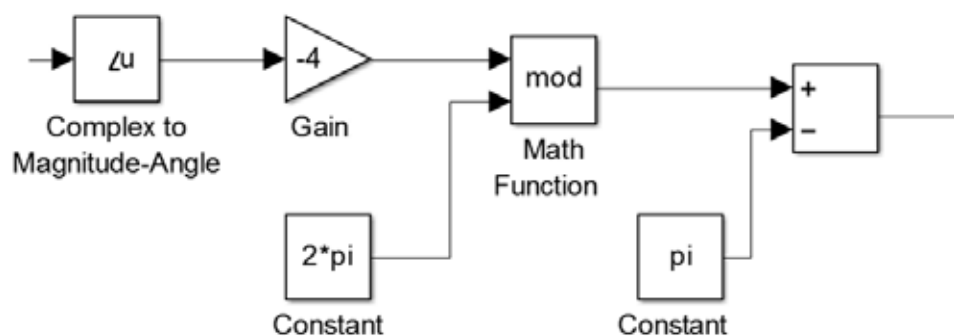
где $A(t)e^{i\varphi(t)}$ – переданный полезный сигнал, а $e^{i\theta(t)}$ – фазовая ошибка. Задача петли ФАПЧ заключается в определении угла $\theta(t)$ и устранении фазовой ошибки путем умножения принятого сигнала на комплексную экспоненту $e^{-i\theta(t)}$:

$$s(t) = \bar{s}(t) \cdot e^{-i\theta(t)} = A(t)e^{i\varphi(t)}e^{i\theta(t)}e^{-i\theta(t)} = A(t)e^{i\varphi(t)}.$$

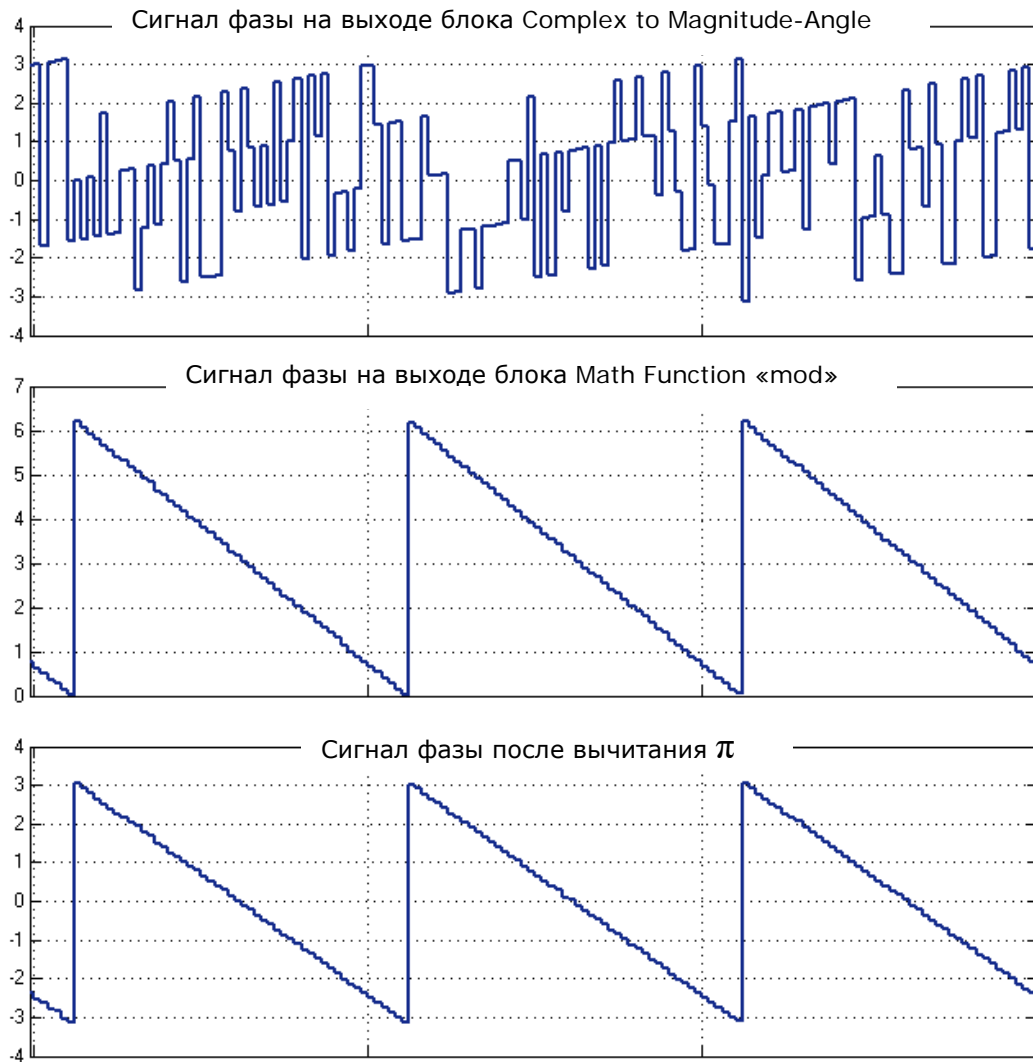
Петля ФАПЧ включает в себя фазовый детектор, петлевой фильтр и генератор, управляемый числом. Задача фазового детектора заключается в определении мгновенной фазовой ошибки, при этом фазовая модуляция, в которой заключена информация, не должна влиять на определяемую фазовую ошибку.

Извлечение фазы осуществляется блоком Complex to Magnitude-Angle. Сигнал фазы на выходе данного блока содержит скачки фазы, вызванные фазовой модуляцией. Для устранения фазовой модуляции сигнал фазы умножается на 4, после чего производится операция определения остатка от деления на 2π (функция «mod»).

Сигнал на выходе функции «mod» принимает диапазон от 0 до 2π . Знак «минус» в блоке умножения фазы на «-4» необходим для преобразования положительной обратной связи в отрицательную обратную связь. Чтобы привести сигнал фазы к диапазону от $-\pi$ до $+\pi$, из сигнала отнимается π .

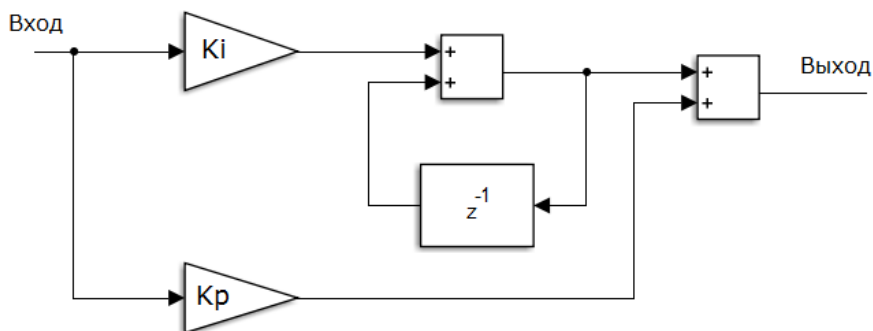


Фазовый детектор



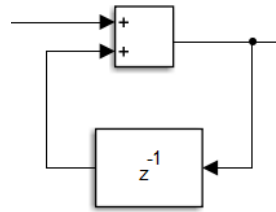
Сигналы фазового детектора при воздействии сигнала с ошибкой по частоте

Петлевой фильтр определяет полосу удержания петли ФАПЧ и, как следствие, уровень шумов, попадающих в полосу петлевого фильтра и поступающих на комплексный генератор, управляемый числом.



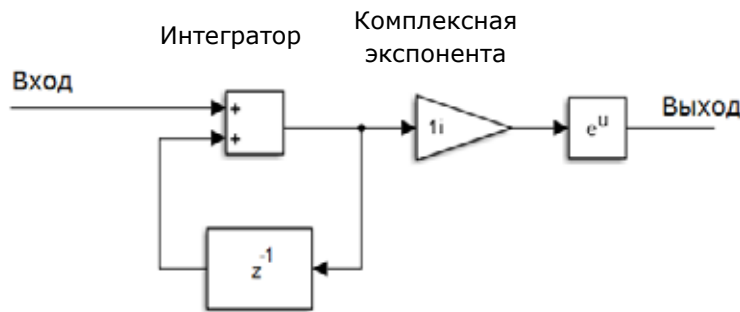
Петлевой фильтр

Сумматор с обратной связью является цифровым интегратором.



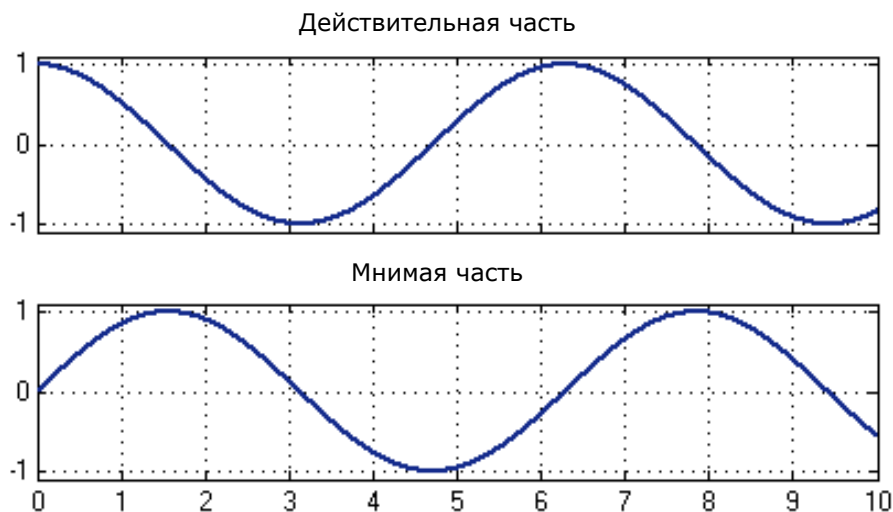
Цифровой интегратор

Комплексный генератор, управляемый числом, образован цифровым интегратором, преобразующим сигнал фазы в сигнал частоты и комплексной экспоненты. В Matlab числом $1i$ обозначается мнимая единица.



Комплексный генератор, управляемый числом

Сигнал на выходе генератора является комплексным и содержит мнимую и действительную части.



Сигнал на выходе комплексного генератора при единичном сигнале (константе) на входе

Настройка параметров модели

1. В блоке *Random Integer Generator* установить значение **M-ary number** = 4.

Установить параметр **Sample time** = **1/символьная скорость**. Символьная скорость определяется как *битовая скорость/количество бит в символе*. Для 4-ФМн в одном символе 2 бита.

Параметр **Initial seed** оставить по умолчанию.

2. Оставить настройки блока *QPSK Modulator Baseband* по умолчанию.
3. В блоке *Upsample* установить параметр **Upsample factor** = **10**, тем самым повышая частоту дискретизации в 10 раз.
4. Произвести настройку блока *Digital Filter Design*:

§ В меню **Response Type** выбрать верхнее положение (Lowpass) и в раскрывающемся меню выбрать **Raised-cosine** – фильтр с характеристикой «приподнятый косинус».

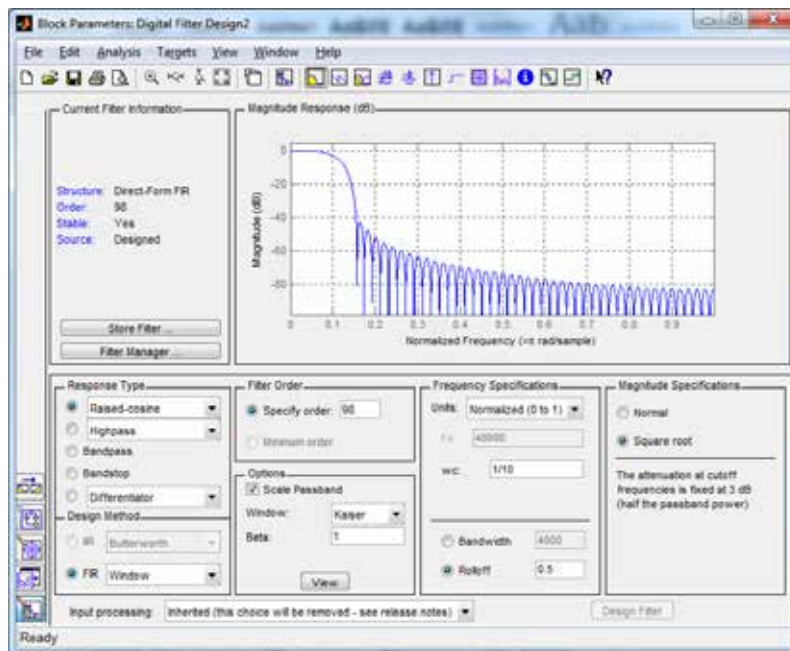
§ В меню **Filter Order** выбрать **Specify order** и задать значение порядка фильтра, равное 98.

§ В меню **Options** задать параметр **Beta** = **1**. В данном меню задаются характеристики оконной функции, с помощью которой взвешивается импульсная характеристика фильтра. Использование оконной функции позволяет уменьшить уровень боковых лепестков АЧХ фильтра.

§ В меню **Frequency Specifications** в раскрывающемся списке **Units** выбрать **Normalized (0 to 1)**. В данном режиме частота среза фильтра задается относительно частоты Найквиста (половины частоты дискретизации). Так как в модели РТСПИ на один символ приходится 10 выборок, то частота среза $\omega_c = 1/10$ от частоты Найквиста.

Установить переключатель в положение **Rolloff** и задать значение коэффициента сглаживания β согласно варианту.

§ В меню **Magnitude Specification** установить переключатель в положение **Square root** – «корень из приподнятого косинуса».



Данный фильтр является согласованным для ФМн и КАМ сигналов со сглаживанием, полученным с помощью формирующего фильтра с характеристикой «корень из приподнятого косинуса».

5. Произвести настройку блока отображения глазковой диаграммы *Discrete-Time Eye Diagram Scope*:

§ Установить параметр **Samples per symbol = 10**, равный количеству выборок на символ.

§ Задать количество отображаемых траекторий **Trace displayed = 400**.

§ Остальные параметры оставить по умолчанию.

6. Произвести настройку блока отображения векторной диаграммы *Discrete-Time Trajectory Scope*:

§ Установить параметр **Samples per symbol = 10**.

§ Задать количество отображаемых траекторий **Symbols displayed = 400**.

7. В блоке задержки *Delay* установить количество задерживаемых отчетов **Delay = 0**. Данная настройка предварительная, впоследствии она будет откорректирована.

Остальные параметры блока *Delay* оставить по умолчанию.

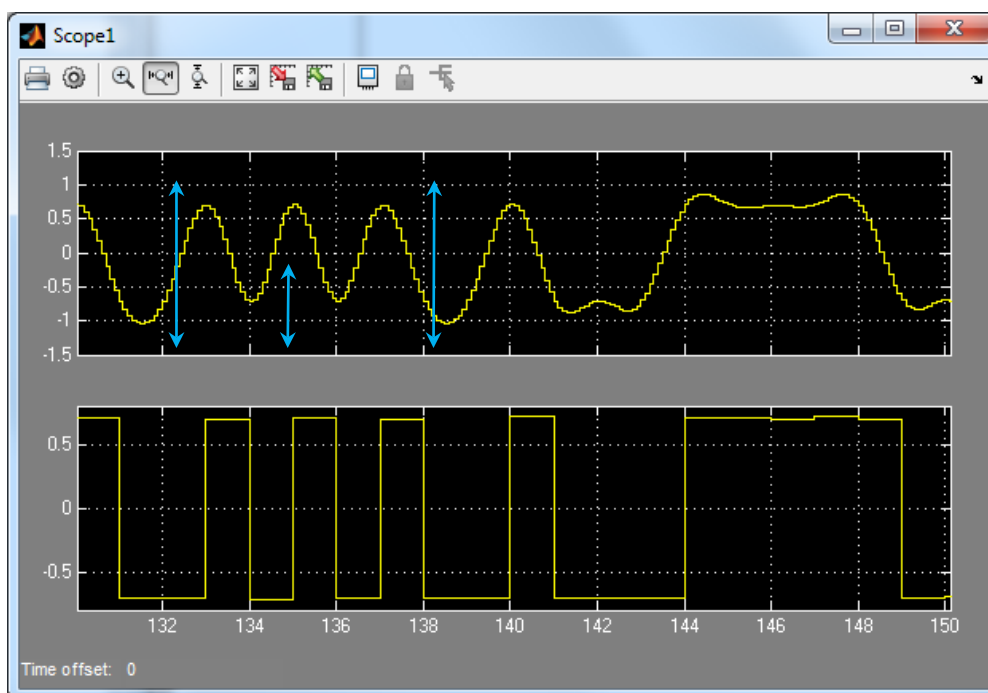
8. В блоке *Zero-Order Hold1*, являющемся частью устройства выборки, установить параметр **Sample time = 1/символьная скорость**.
9. В блоке *AWGN Channel* задать параметр **EsNo = 100 дБ**, определяющий сигнал/шум.

Установить параметр **Input signal power = 1**.

Установить параметр **Symbol period = 1/символьная скорость**.

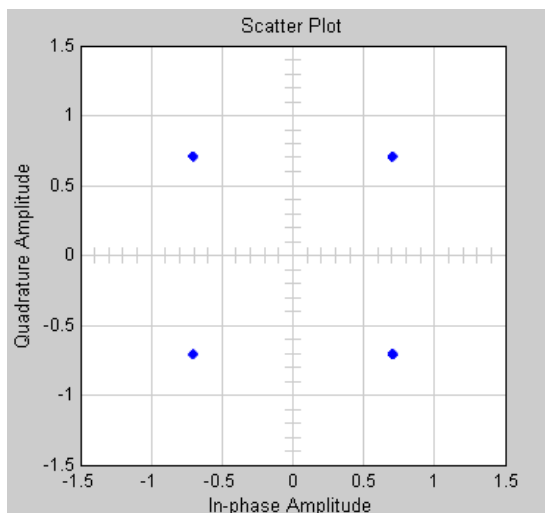
Настройку остальных блоков произвести аналогично настройке из предыдущей лаб. работы.

10. После настройки всех блоков необходимо настроить начальный сдвиг времени в устройстве выборки аналогично процедуре настройки из предыдущей лаб. работы. Для этого кратковременно запускается симуляция модели и останавливается, после чего открывается осциллограф Scope1 и анализируется осциллограмма. Момент выборки символа (нижняя осциллограмма) должен точно совпадать с максимумом сигнала (верхняя осциллограмма). В случае если момент выборки не попадает в максимум сигнала, необходимо задать другое значение задержки *Delay* (от 0 до 9) в устройстве выборки.

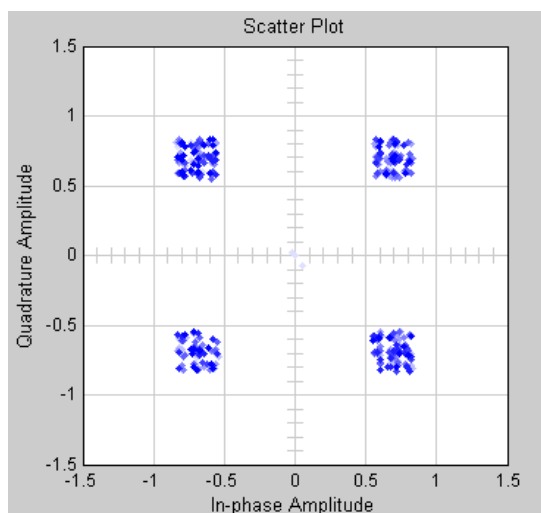


Пример **корректной** настройки – максимумы символа на входе совпадают с моментом фиксации сигнала на выходе

11. Проконтролировать корректность настройки по «звездной» диаграмме. В случае если диаграмма не собирается в точки, откорректировать задержку *Delay*.



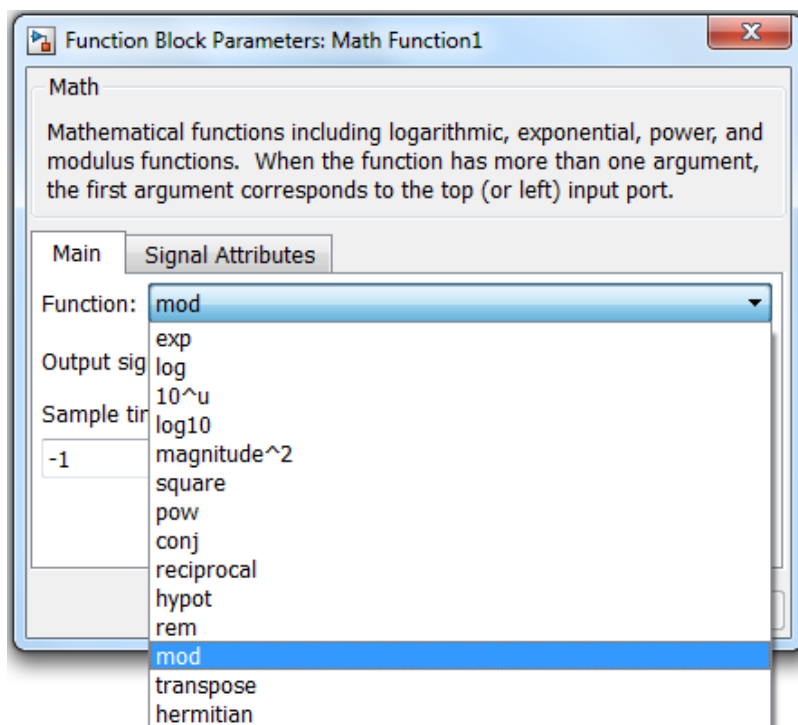
Результат **корректной** настройки устройства выборки



Результат **некорректной** настройки устройства выборки

12. В блоке *Complex to Magnitude-Angle* в раскрывающемся меню **Output** выбрать **Angle**.

13. В блоке *Math Function1* в раскрывающемся списке **Function** выбрать **mod**.



14. В блоках Constant1 и Constant2 установить $2 \cdot \pi i$ и πi соответственно.
15. Задать интегрирующий K_i и пропорциональный K_p коэффициенты в блоках Gain3 и Gain4 согласно варианту.
16. В блоке Gain5 установить параметр Gain, равный $1i$. В системе Matlab число $1i$ обозначает мнимую единицу.

Ход выполнения моделирования

1. Построить спектр, глазковую, «звездную» и векторную диаграммы.
 - § Установить бесконечное время симуляции, записав в качестве значения **inf**.
 - § Запустить симуляцию и выждать время, в течение которого будет произведено усреднение спектра, после чего симуляцию можно остановить.
 - § Сохранить полученные спектры через меню *File -> Print to Figure*. В открывшемся окне *Figure* выбрать *File -> Save As* и выбрать формат .jpg или .png.
 - § Сделать скриншот окон векторной и «звездной» диаграмм через комбинацию клавиш Alt + Print Screen.
 - § Определить параметр **Offset** в блоке *Discrete-Time Eye Diagram Scope*, при котором глазковая диаграмма будет симметрична относительно центральной вертикальной оси. Сделать скриншот глазковой диаграммы.
 - § Сделать скриншот окна «звездной» диаграммы через комбинацию клавиш Alt + Print Screen.
2. Сравнить спектрограммы сигналов 4-ФМн и 2-ФМн (спектрограммы сигналов 2-ФМн получены в лаб. работе № 1).
3. Определить максимальный сдвиг частоты несущей, при котором петля ФАПЧ обеспечивает синхронизм при **$E_s/N_o = 100$ дБ** и **$E_s/N_o = 10$ дБ**.

Изменяя параметр **Frequency offset** блока *Phase/Frequency Offset*, запускать моделирование и осуществлять контроль по «звездной» диаграмме. В случае если петля ФАПЧ входит в синхронизм, через некоторое время «звездная» диаграмма должна прекратить вращаться. Если вращение не прекращается, частотный сдвиг превысил максимальную частоту захвата петли ФАПЧ.

4. Построить осциллограммы сигналов в контрольных точках петли ФАПЧ при сдвиге частоты несущей, равном $1/500$ от символьной скорости, и $E_s/N_0 = 100$ дБ. Время симуляции задать равным 1000 длительностей символов.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

Кодовое разделение каналов

Задания

1. Ознакомиться с описанием модели РТСПИ с кодовым разделением каналов.
2. Собрать и настроить модель РТСПИ согласно рис. 4, 5.
3. Построить спектр группового сигнала.
4. Определить зависимость вероятности битовой ошибки от задержки сигнала (величины временной рассинхронизации канальных интервалов).

Варианты

Вариант	1	2	3	4	5	6	7
Битовая скорость, бит/с	600	1200	2400	3600	4800	7200	8400
Номер кода Уолша (Code index)	7	6	5	4	3	2	7
Вариант	8	9	10	11	12	13	14
Битовая скорость, бит/с	9600	19200	38400	50	100	200	300
Номер кода Уолша (Code index)	6	5	4	3	2	7	6

Настройка параметров модели

1. В блоке *Random Integer Generator* установить значение **M-ary number = 2**.

Установить параметр **Sample time = 1/символьная скорость**. Символьная скорость и битовая скорость для 2-ФМн равны.

Установить параметр **Initial seed = 60 + № передатчика**. Параметр **Initial seed** задает начальное значение генератора ПСП. Каждый передатчик должен передавать разную псевдослучайную последовательность.

2. В блоке *Walsh Code Generator* передающего устройства установить параметр **Code length = 8**. Данный параметр задает размер кодовых последовательностей Уолша.

Установить параметр **Code index = № передатчика**. Данный параметр задает порядковый номер кодовой последовательности из матрицы Адамара. Может принимать значения от 0 до **Code length-1**.

Установить параметр **Sample time = 1/(8×символьная скорость)**.

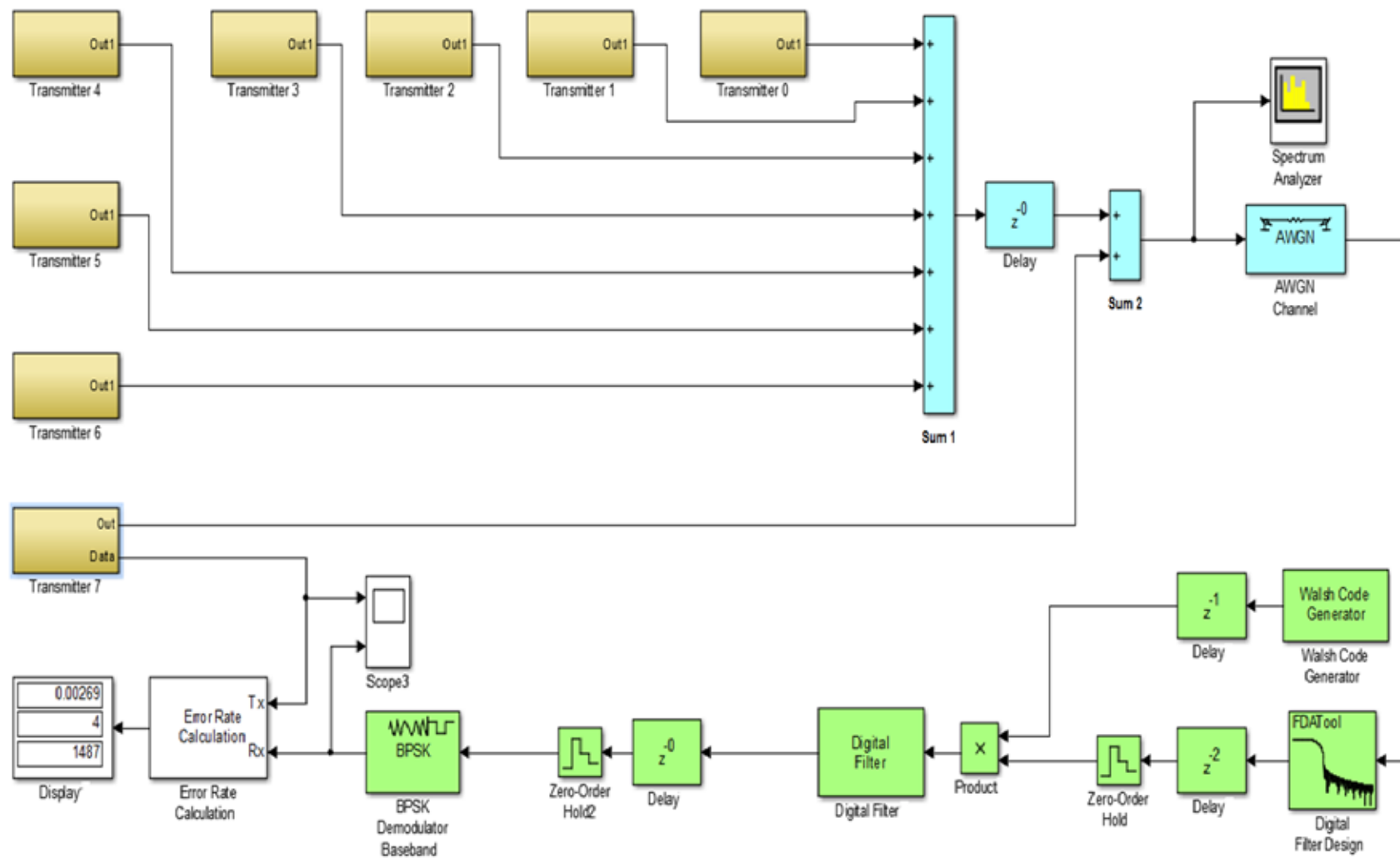


Рис. 4. Модель передающего устройства с кодовым разделением каналов

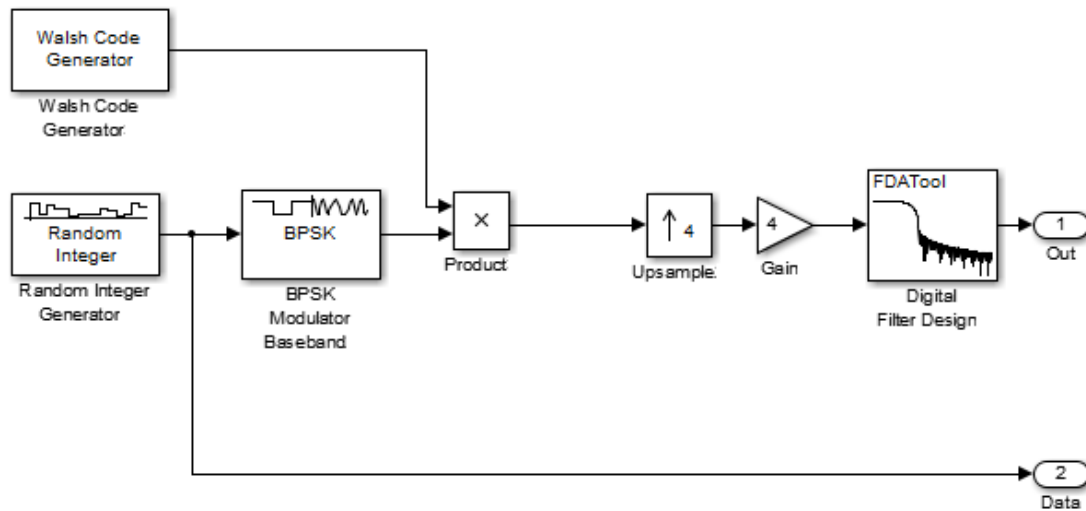
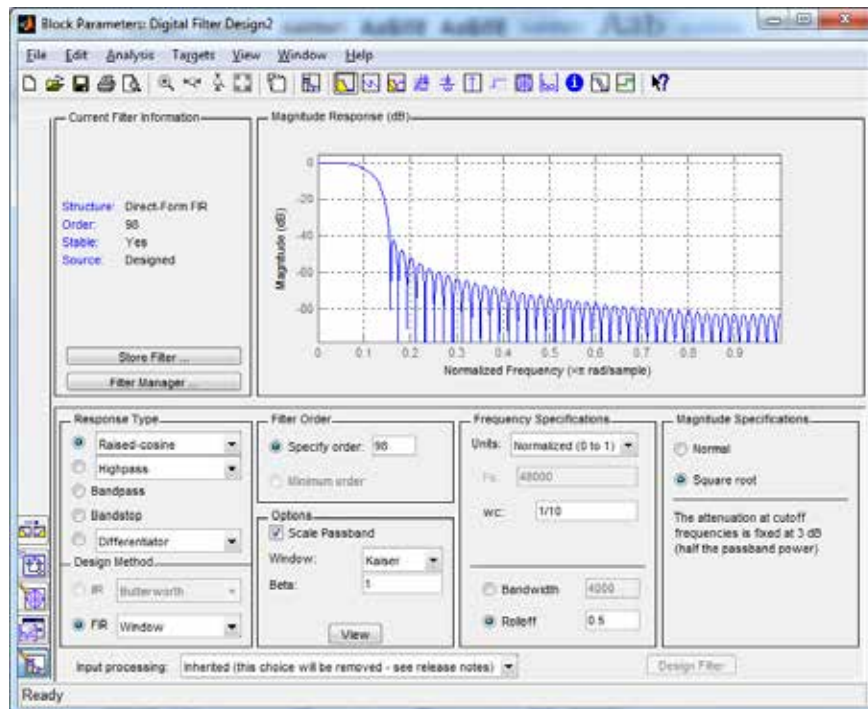


Рис. 5. Модель передающего устройства «Transmitter»

3. Настройки блока BPSK Modulator Baseband оставить по умолчанию.
4. В блоке *Upsample* установить параметр **Upsample factor = 4**.
5. Настройки блока *Digital Filter Design* произвести согласно рисунку ниже.

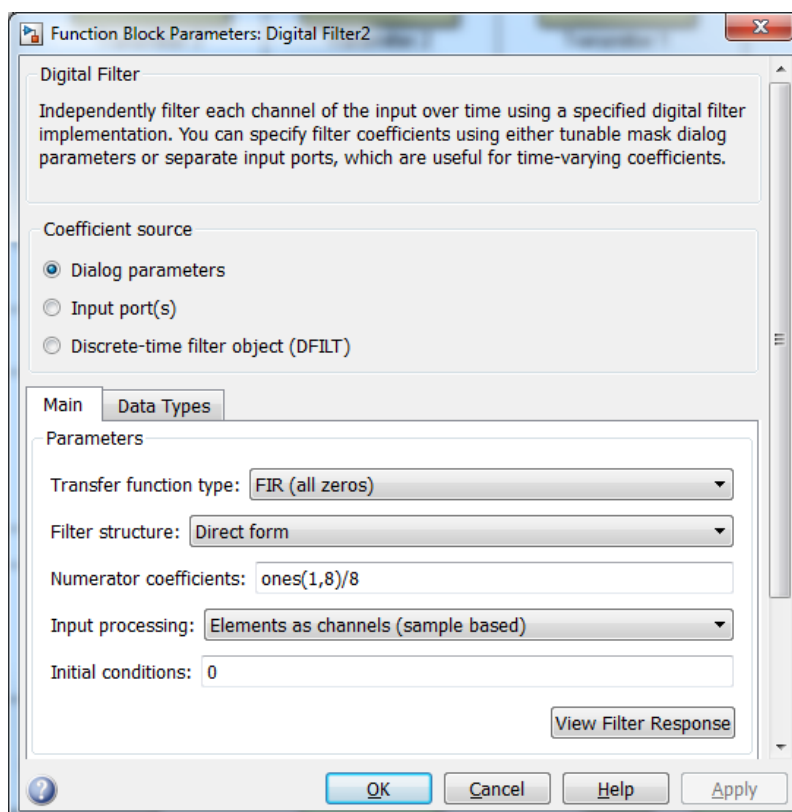


Блоки, образующие передатчик, необходимо объединить в подсистему. Для этого следует выделить блоки передатчика и с помощью правой кнопки мыши выбрать **Create Subsystem from Selection**.

6. В блоках сумматоров задать количество входов **List of signs = 7** для *Sum1* и **List of signs = 2** для *Sum2*.
7. В блоке Delay канала связи установить задержку **Delay (samples) = 0**. При этой задержке исследуемый передатчик и остальные передатчики синхронизированы, и следовательно выполняется условие ортогональности сигналов всех передатчиков.
8. В блоке *AWGN Channel* задать параметр **EsNo = 100 дБ**, определяющий сигнал/шум.

Установить параметр **Input signal power = 1**.

Установить параметр **Symbol period = 1/символьная скорость**.
9. Приемный фильтр должен быть идентичен формирующему фильтру передающего устройства.
10. В блоке *Zero-Order Hold1* установить параметр **Sample time = 1/(8 * символьная скорость)**.
11. В блоке *Digital Filter* задать настройки согласно рисунку ниже.



-
12. В блоке *Zero-Order Hold2* установить параметр **Sample time = 1/символьная скорость**.
 13. В блоке *Error Rate Calculation* задать параметр **Receive delay = 4**.
 14. Настройки остальных блоков оставить по умолчанию.
 15. Запустить моделирование и убедиться, что вероятность ошибок равна нулю.

Ход выполнения моделирования

1. Определить вероятность битовой ошибки при синхронной работе всех передатчиков и сравнить с вероятностью битовой ошибки при оптимальном когерентном приеме 2-ФМн.

§ Установить бесконечное время симуляции, записав в качестве значения **inf**.

§ Установить параметр **Eb/No = 6 дБ** в блоке *AWGN Channel*.

§ Запустить симуляцию и выждать, когда количество *ошибочно* принятых бит превысит 100. Остановить симуляцию и записать измеренные значения.

§ Сравнить полученный результат с вероятностью битовой ошибки при оптимальном когерентном приеме 2-ФМн.

2. Исследовать влияние канальной задержки на вероятность битовой ошибки.

§ Изменяя величину задержки в канале связи от 1 до 16 и проводя моделирование, зафиксировать вероятность битовой ошибки.

§ Построить график зависимости вероятности битовой ошибки от величины задержки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Феер, К. Беспроводная цифровая связь : пер. с англ. / К. Феер ; под ред. В. И. Журавлёва. – М. : Радио и связь, 2000. – 520 с.
2. Прокис, Д. Цифровая связь : пер. с англ. / Д. Прокис ; под ред. Д. Д. Кловского. – М. : Радио и связь, 2000. – 797 с.
3. Скляр, Б. Цифровая связь. Теоретические основы и применение : пер. с англ. / Б. Скляр. – 2-е изд. – М. : Вильямс, 2003. – 1104 с.
4. Сергиенко, А. Б. Цифровая обработка сигналов : учеб. пособие для вузов по направлению 210300 «Радиотехника» / А. Б. Сергиенко. – 3-е изд. – СПб. : БХВ-Петербург, 2013. – 768 с.