

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

**Федеральное государственное образовательное
учреждение высшего профессионального образования**

**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)**

А.М. ГОЛИКОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ КАСКАДНЫХ КОДОВ

Учебно-методическое пособие по лабораторной работе

Томск 2019

Голиков, А. М. Исследование каскадных кодов: Учебно-методическое пособие по лабораторной работе [Электронный ресурс] / А. М. Голиков. — Томск: ТУСУР, 2019. — 18 с.

В лабораторной работе проводится исследование каскадных кодов на основе разработки программы для моделирования такой системы в среде МАТ-ЛАБ. Лабораторная работа предназначена для направления подготовки магистров 11.04.02 "Инфокоммуникационные технологии и системы связи" по магистерским программам подготовки: "Радиоэлектронные системы передачи информации", "Оптические системы связи и обработки информации", "Инфокоммуникационные системы беспроводного широкополосного доступа", "Защищенные системы связи", для направления подготовки магистров 11.04.01 "Радиотехника" по магистерской программе подготовки: "Радиотехнические системы и комплексы", "Радиоэлектронные устройства передачи информации", "Системы и устройства передачи, приема и обработки сигналов", "Видеоинформационные технологии и цифровое телевидение" и специалитета 11.05.01 "Радиоэлектронные системы и комплексы" специализации "Радиолокационные системы и комплексы", "Радиоэлектронные системы передачи информации", "Радиоэлектронные системы космических комплексов", а также бакалавриата направления 11.03.01 "Радиотехника" (Радиотехнические средства передачи, приема и обработки сигналов), бакалавриата 11.03.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи (Системы мобильной связи, Защищенные системы и сети связи, Системы радиосвязи и радиодоступа, Оптические системы и сети связи) и может быть полезна аспирантам.

ОГЛАВЛЕНИЕ

1 ВВЕДЕНИЕ	4
2.Теоретическая часть	4
3. Практическая часть	6
ЛИТЕРАТУРА.....	18

1 Введение

В настоящее время известно большое количество достаточно мощных кодов с высокой исправляющей способностью при высоких информационных скоростях. Однако их применение ограничено сложностью реализации оптимальных декодеров, обеспечивающих минимум вероятности ошибочного декодирования. По этой причине на практике чаще всего используются составные или каскадные коды. В таких конструкциях множество символов кодового слова может быть разбито на различные подмножества, сформированные на основе коротких кодов, допускающих простые в реализации процедуры декодирования.

2. Теоретическая часть

Каскадными называют коды, в которых кодирование осуществляется в два уровня; имеется внутренний и внешний коды, с помощью которых и достигается желаемая надёжность передачи сообщений. Внутренний код связан с модулятором. Демодулятор, как правило, настраивается для исправления большинства канальных ошибок. Внешний код, чаще всего высокоскоростной (с низкой избыточностью), снижает вероятность появления ошибок до заданного значения. Основной причиной использования каскадного кода является низкая степень кодирования и общая сложность реализации, меньшая той, которая потребовалась бы для осуществления отдельной процедуры кодирования.

В одной из наиболее популярных систем каскадного кодирования для внутреннего кода применяется сверточное кодирование по алгоритму Витерби, а для внешнего – код Рида-Соломона с чередованием между двумя этапами кодирования. Функционирование таких систем при E_b/N_0 , находящемся в пределах от 0,2 до 2,5 дБ, для достижения $P_b=10^{-5}$ реально достижимо в прикладных задачах. В этой системе демодулятор выдает мягко квантованные кодовые символы на внутренний свёрточный декодер, который, в свою очередь, выдает жестко квантованные кодовые символы с пакетными ошибками на декодер Рида-Соломона.

Комбинированные методы преобразования сигнала предполагают использование одновременно нескольких различных способов скремблирования (как частотных, так и временных), число которых ограничивается, как правило, возможностями технической реализации аналоговых скремблеров. Динамические скремблеры существенно дороже скремблеров с фиксированными параметрами преобразования сигнала, сильнее влияют на характеристики радиосредств и требуют начальной синхронизации.

Скремблер (шифровать, перемешивать) – программное или аппаратное устройство (алгоритм), выполняющее скремблирование – обратимое преобразование цифрового потока без изменения скорости передачи с целью получения свойств случайной последовательности. После скремблирования появление «1» и «0» в выходной последовательности равновероятны. Скремблирование – обратимый процесс, то есть исходное сообщение можно восстановить, применив обратный алгоритм.

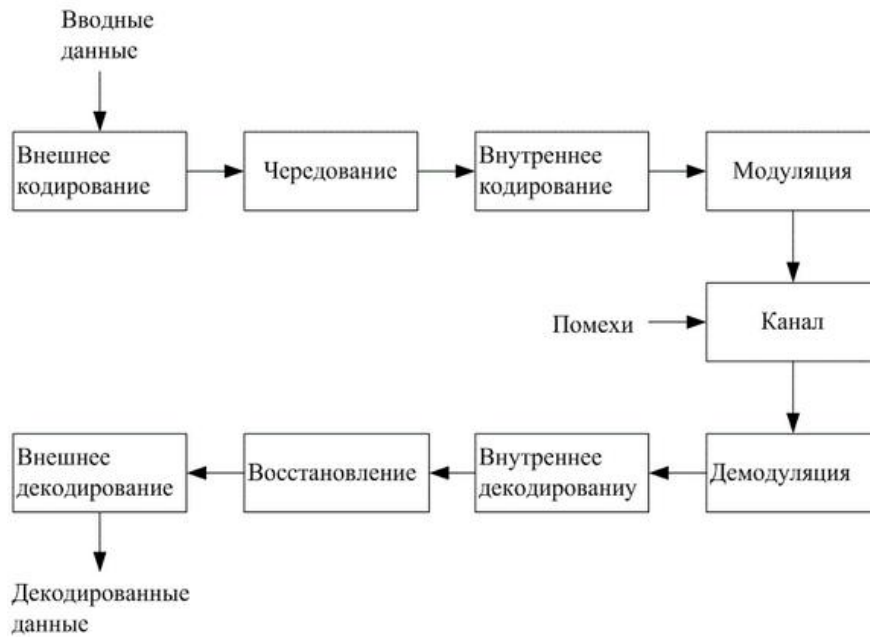


Рис. 1 – Обобщенная структурная схема исследования каскадных кодов

Каскадные коды были введены Форни в качестве линейных блочных помехоустойчивых кодов с возможной большой длиной блока n и весьма высокой корректирующей способностью. Эти цели достигаются благодаря применению нескольких сравнительно простых уровней (каскадов) кодирования и декодирования. Наиболее распространенной является схема с двумя уровнями кодирования. Один код при этом называется внешним, а другой – внутренним. Последовательные каскадные коды часто используются в системах с ограничением мощности, таких как космические зонды. Самая распространенная из этих схем содержит внешний код Рида-Соломона (выполняется первым, убирается последним), который следует за сверточным внутренним кодом (выполняется последним, убирается первым). Турбокод можно считать обновлением структуры каскадного кодирования с итеративным алгоритмом декодирования связанной кодовой последовательности.

Общая схема двухуровневого каскадного кода показана на рис. 2.

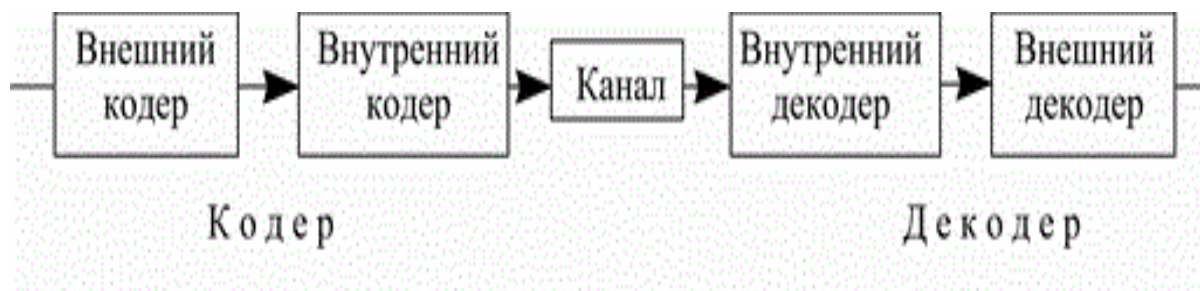


Рис. 2 - Двухуровневый каскадный код

3 Практическая часть

Моделирование каскадных кодов в MATLAB Simulink

Виртуальная модель передачи данных с исправлением ошибок при помощи каскадного кода была реализована в среде Simulink Matlab. Модель демонстрирует работу кодера Рида-Соломона (внешний код) и кодера Турбо-кодов (внутренний код), позволяет исследовать исправляющую способность кодов для разных видов модуляции и сравнить её характеристики с работой указанных выше кодеров в отдельности.

На рисунке 3 приведена модель:

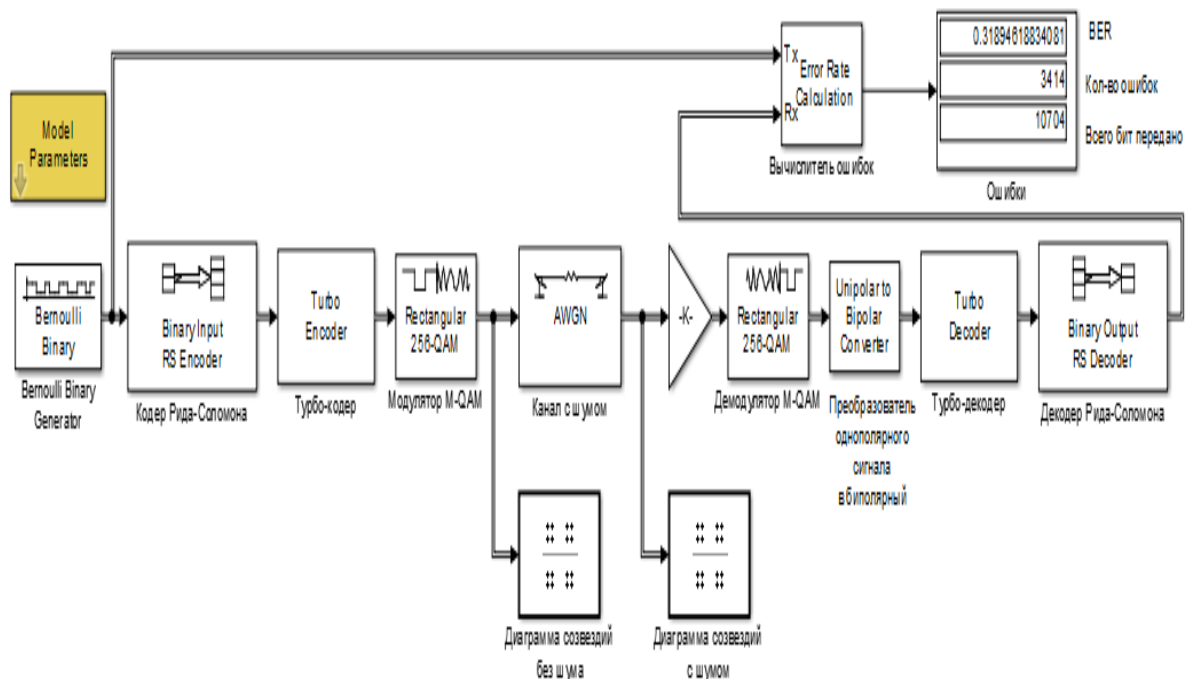


Рис. 3 - MATLAB Simulink модель исследования каскадных кодов

В её основу положены следующие элементы, встроенные в библиотеку Simulink:

- Bernoulli Binary Generator
- Binary Input RS Encoder
- Turbo Encoder
- Rectangular QAM Modulator Baseband
- AWGN Channel
- Rectangular QAM Demodulator Baseband
- Unipolar to Bipolar Converter
- Turbo Decoder
- Binary Output RS Decoder
- Error Rate Calculation

- Discrete Time Scatter Plot Scope
- Gain
- Display (Дисплей, отражающий ошибки)

Далее представлено описание основных блоков:

Bernoulli Binary Generator (генератор псевдослучайной последовательности) – генерирует случайную бинарную последовательность.

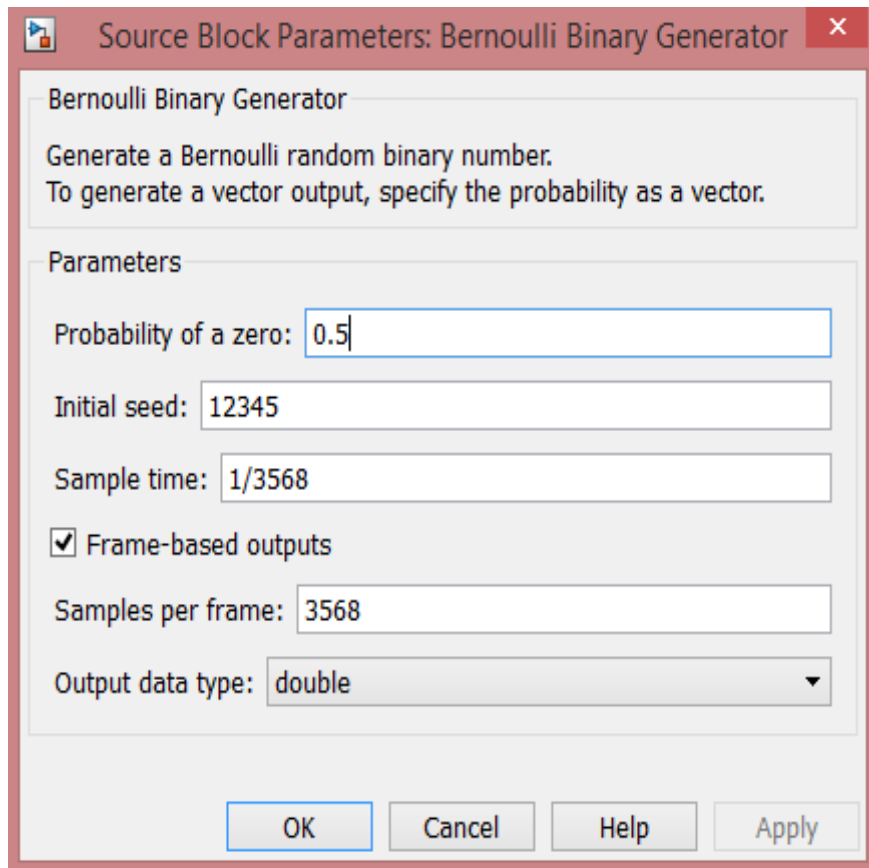


Рис. 4 - Параметры блока «Bernoulli Binary Generator»

«Probability of a zero» - вероятность появления нуля;

«Initial seed» - начальное значение для генерации;

«Sample time» - длительность сэмпла;

«Samples per frame» - размер фрейма.

Binary Input RS Encoder – кодер Рида-Соломона (рисунок 3.7).

«Codeword length N» - общее количество бит;

«Message length K» - количество информационных бит.

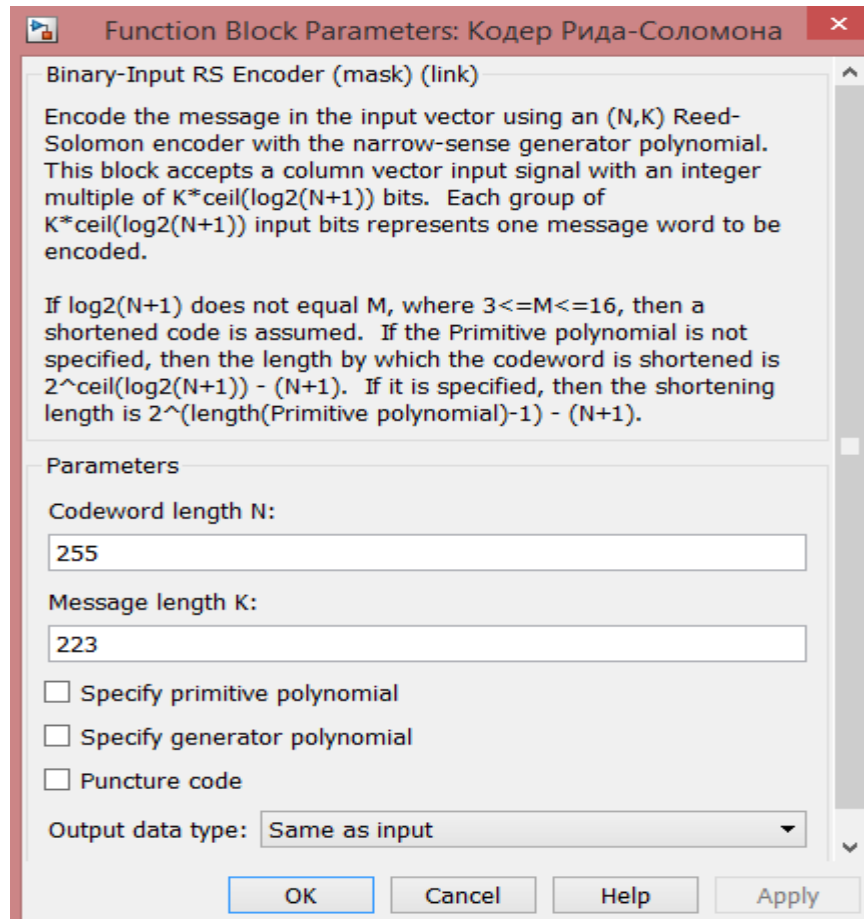


Рис. 5 - Параметры блока «Binary Input RS Encoder»

Данный блок имеет следующую структуру внутри:

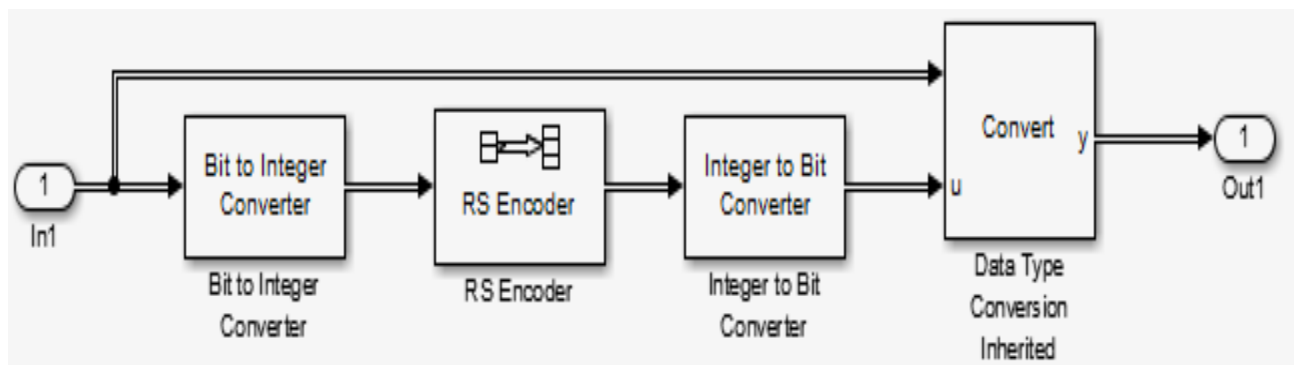


Рис. 6 - Состав блока «Binary Input RS Encoder»

Таким образом, информационные биты, поступающие со входа генератора преобразуются в тип «Integer», кодируются и преобразуются обратно, затем полученные биты конвертируются в тот тип данных, который изначально был на входе кодера.

Turbo Encoder – Турбо-кодер (рисунок 7).

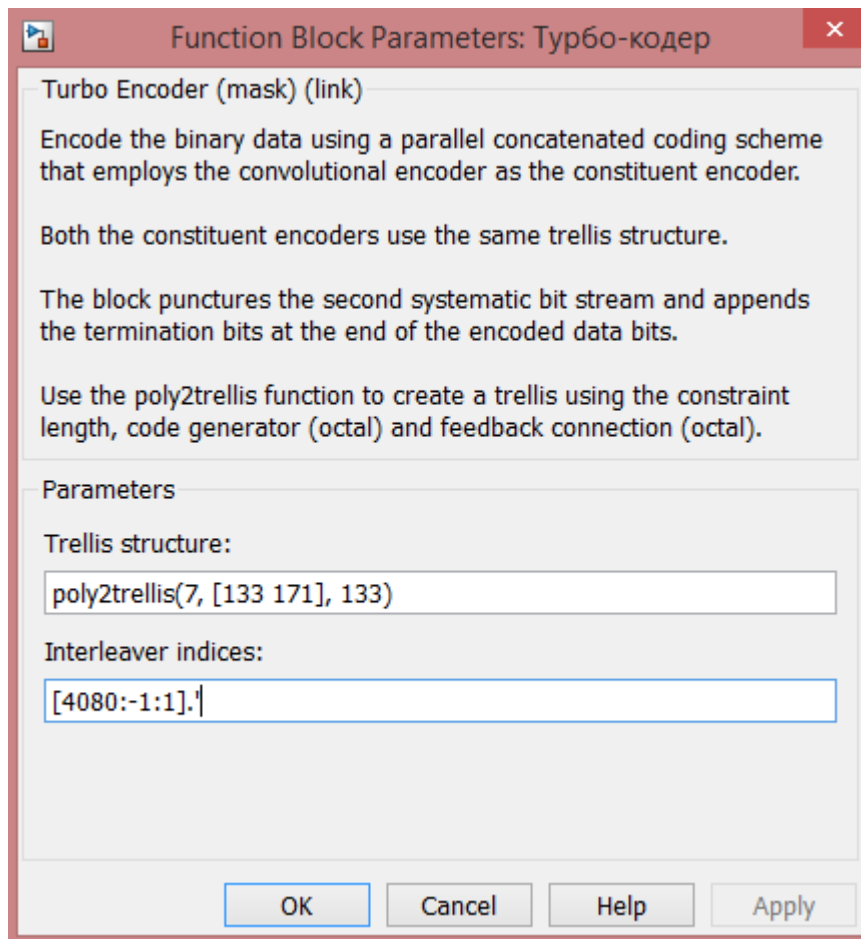


Рис. 7 - Параметры блока «Turbo Encoder»

«Trellis structure» - структура треллис-модуляции.

Треллис-модуляция (ТСМ – Trellis Coded Modulation) представляет собой способ, который позволяет обеспечить повысить скорость передачи сообщения с сохранением уровня помехоустойчивости. Этот способ отличается тем, что помехоустойчивое кодирование и тип модуляции используются совместно. Выбранная соответствующим образом пара помехоустойчивый код – способ модуляции часто также носит название сигнально-кодированная конструкция (СКК).

Для кодирования использован один из наиболее часто употребляемых свёрточных кодов – код (171,133,7), который кодирует последовательность со скоростью 1/2.

«Interleaver indices» - входные параметры перемежителя.

Схема турбокодера имеет следующую структуру (рисунок 8):

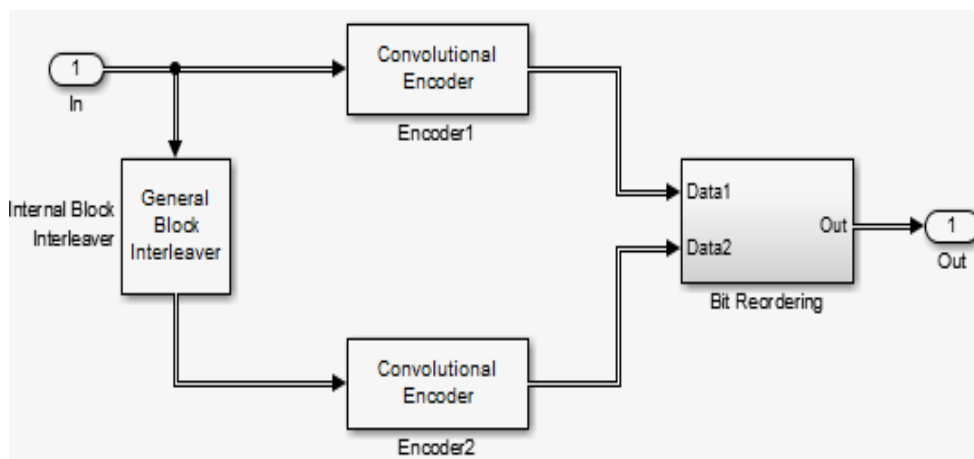


Рис. 8 - Структура блока «Turbo Encoder»

Поток бит распараллеливается на два. В первом случае биты поступают на свёрточный кодер (133, 171), а во втором потоке биты сначала проходят перемежитель, затем поступают на аналогичный свёрточный кодер. Блок «Bit Reordering» выстраивает биты в последовательный поток.

Rectangular QAM Modulator Baseband – модулятор QAM-M (рисунок 9).

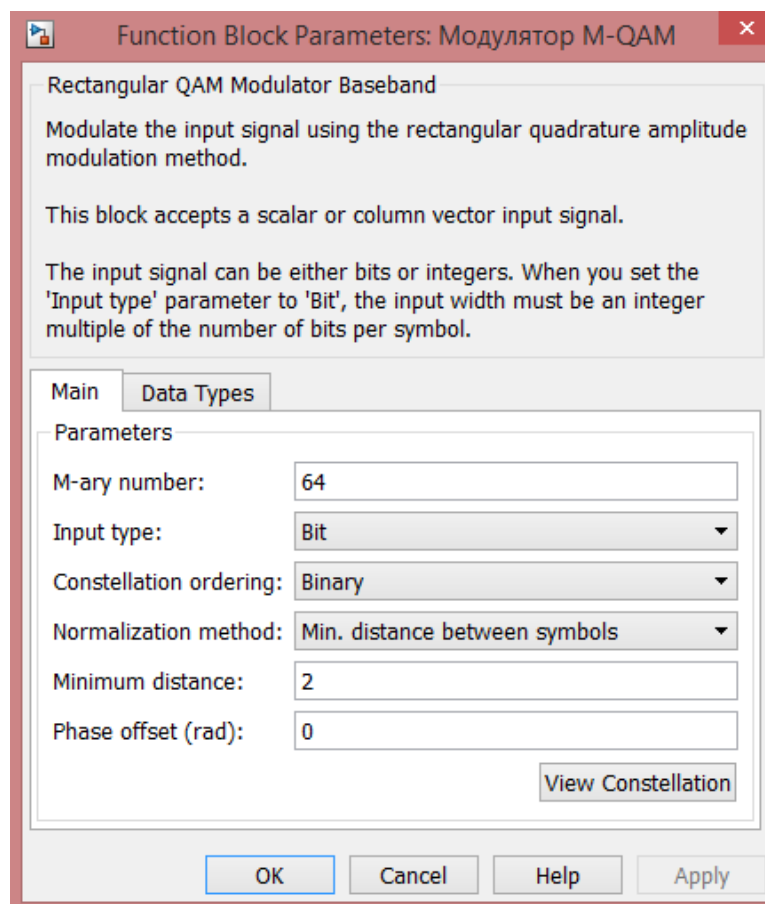


Рис. 9 - Параметры блока «Turbo Encoder»

«M-ary number» - количество позиций в QAM-M;
 «Input type» - тип входных данных;
 «Constellation ordering» - порядок построения созвездия (рисунок 10).
 Остальные параметры по умолчанию.

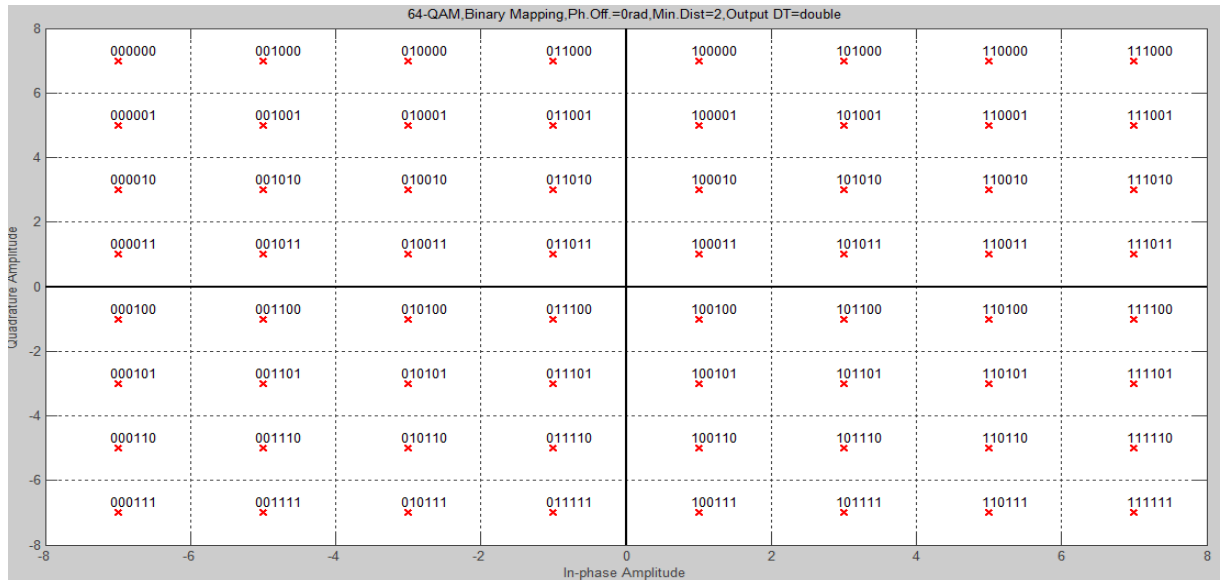


Рис. 10. Диаграмма построения созвездий

AWGN Channel (Канал связи) – добавляет «белый» гауссовский шум в канале (рисунок 11).

«Variance» - считывает параметр E_b/N_0 из блока Model Parameters.

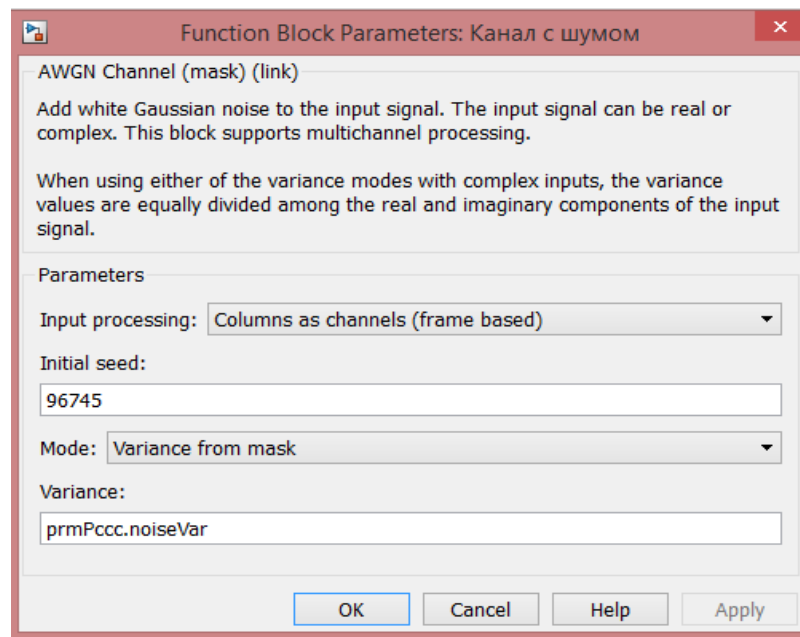


Рис. 11 - Параметры блока «AWGN»

Discrete Time Scatter Plot Scope – Блок для отражения диаграммы созвездий.

Rectangular QAM Demodulator Baseband – демодулятор QAM-M, обладает теми же параметрами, что и модулятор.

Unipolar to Bipolar Converter – Преобразователь сигнала из однополярного в биполярный. На вход турбо-декодера необходимо подавать биполярный сигнал.

Turbo Decoder – Турбо-декодер (рисунок 12).

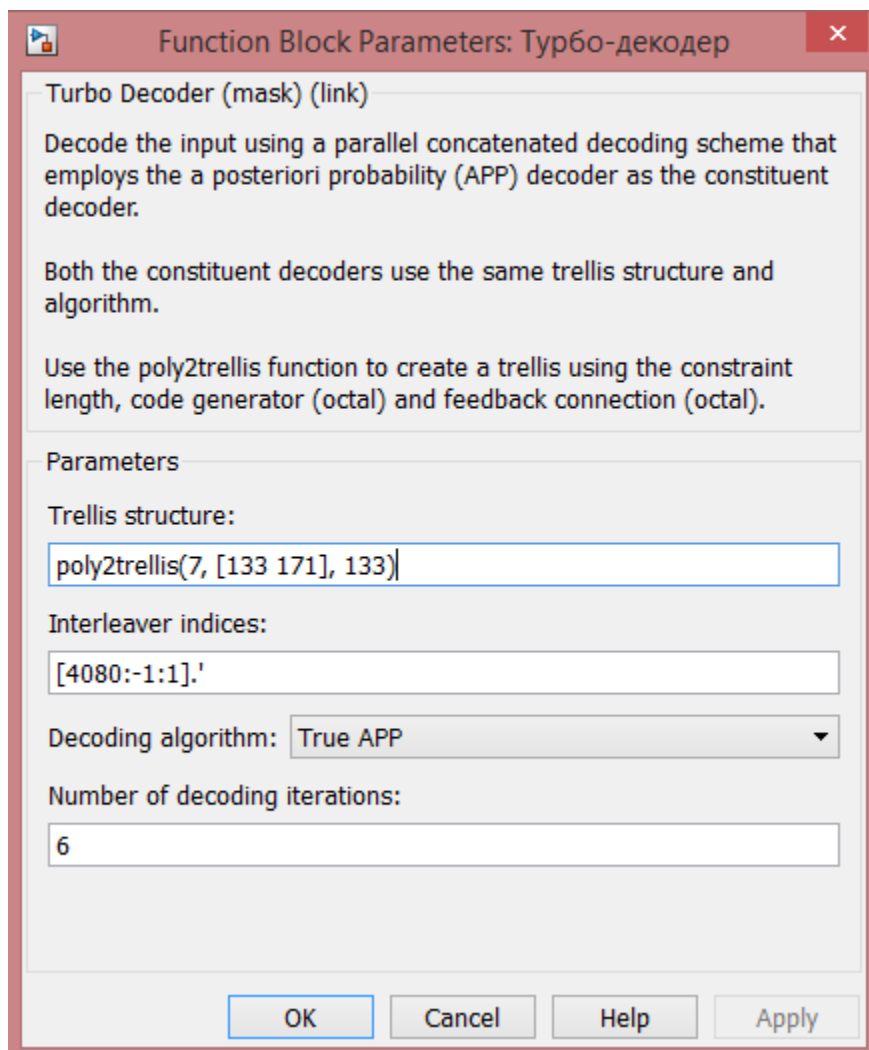


Рис. 12 - Параметры блока «Turbo decoder»

Первые два параметра задаются аналогично параметрам кодера.

«Number of decoding iterations» – количество итераций декодирования. Декодирование в турбо-декодере происходит в несколько итераций. Чем больше итераций, тем точнее декодирование. Однако, большое количество не даёт результата, а лишь увеличивает длительность вычислений и может даже ухудшить помехоустойчивость.

Схема блока имеет следующую структуру (рисунок 13):

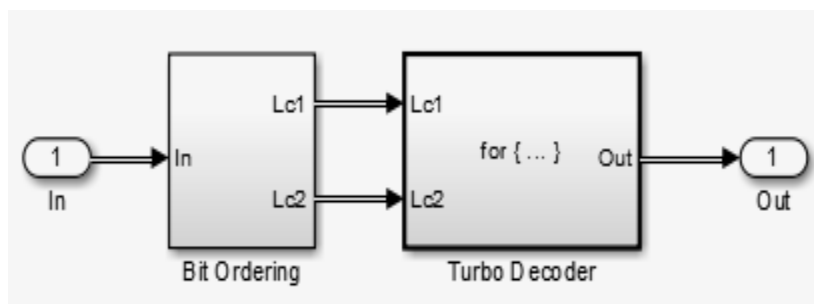


Рис. 13 - Структура блока «Turbo-decoder»

«Bit Ordering» - Выстраивание потока бит в параллельный поток.
Схема самого турбо-декодера представлена на рисунке 14:

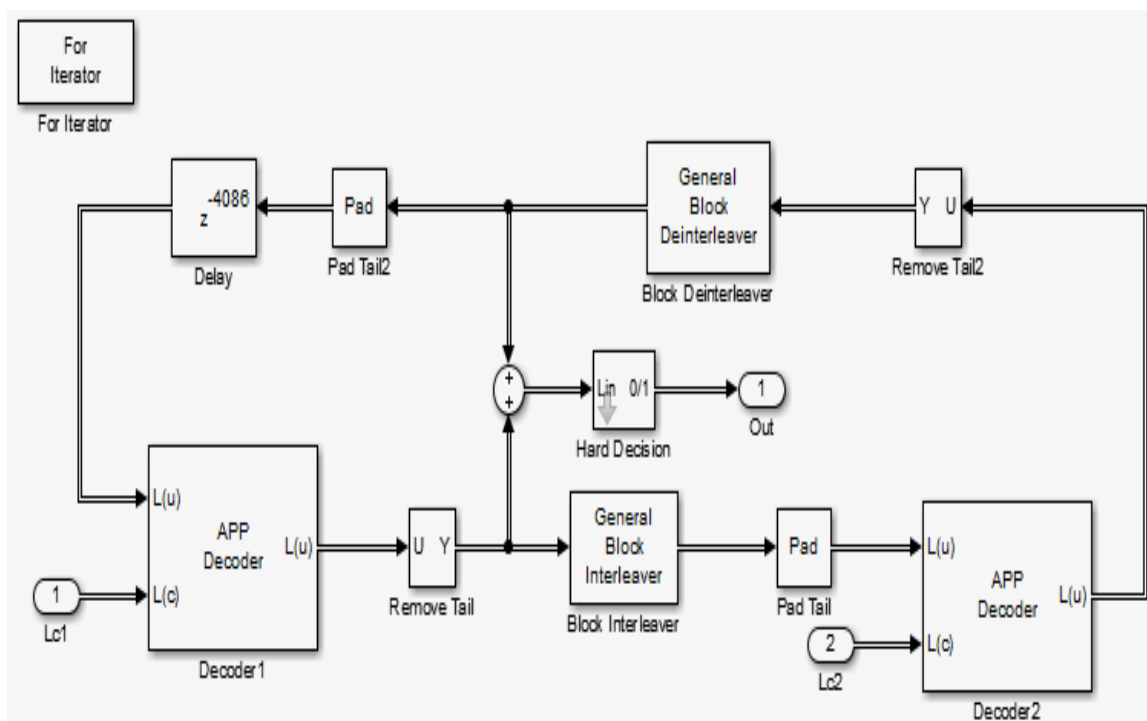


Рис. 14 - Схема турбо-декодера

Декодер имеет сложную структуру. Параллельный поток приходит на входы (1) и (2). Данные с входа (2) декодируются и поступают на вход блока на депережежитель. Затем данные поступают на сумматор и через задержку на декод «Decoder1». Выход этого декодера поступает на сумматор и на перемежитель, данные с которого поступают на второй декодер. Таким образом, декодеры влияют друг на друга и помехоустойчивость и сумма их выходных значений поступает на блок принятия жёстких решений «Hard Decision». Операция декодирования повторяется столько раз, сколько указано в блоке турбо-декодера в параметре «количество итераций».

Binary Input RS Decoder – декодер Рида-Соломона. Параметры и структура аналогична блоку кодера.

Error Rate Calculation – вычислитель ошибок между переданной и принятой последовательностью.

Display - дисплей, отражающий ошибки.

Исследование каскадных кодов

1. Спроектированная модель передачи данных демонстрирует работу каскадного кодирования. Данная модель позволяет исследовать применение последовательно-параллельного кодирования на примере использования кодера Рида-Соломона (внешний код) и Турбо-кодера (внутренний код), а также позволяет исследовать исправляющую способность кодов для разных видов модуляции и сравнить её характеристики с работой указанных выше кодеров в отдельности.

2. В качестве турбо-кода используются два параллельных свёрточных кодера с треллис-модуляцией (для ускорения передачи данных).

На рисунке 15 представлен график зависимости битовой вероятности ошибки (BER) от отношения сигнал/шум в канале (SNR) для разных видов модуляции:

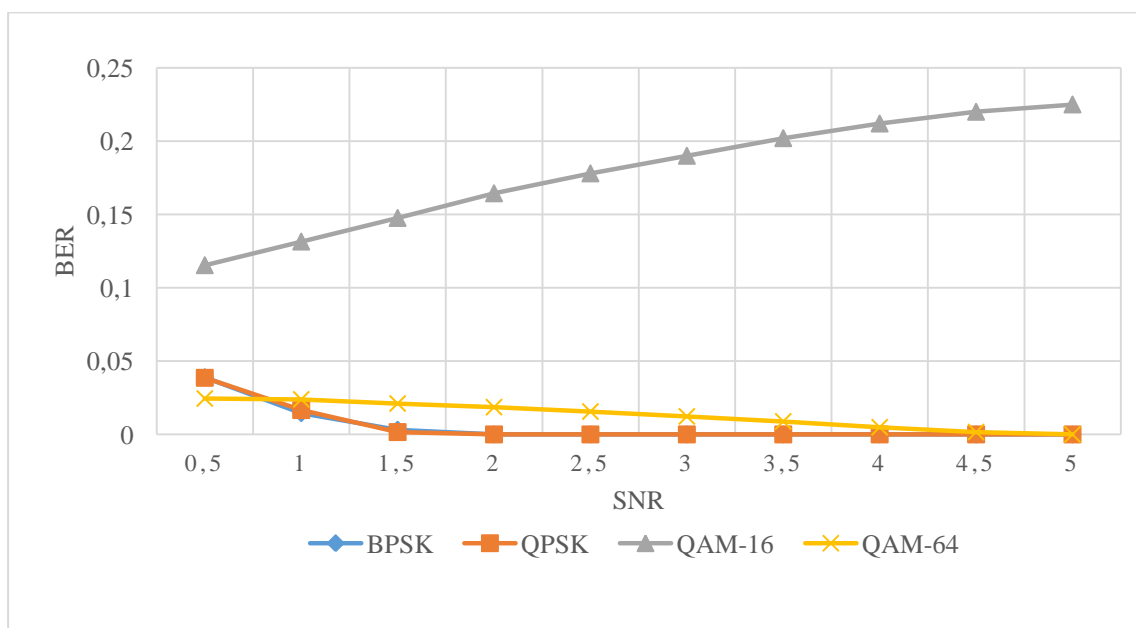


Рис. 15 - График зависимости BER от SNR для разных видов модуляции

Из рисунка 15 можно заметить, что зависимость BER от SNR является не-правильной в явном виде. Предположительно, данное явление связано с ошибочным программным кодом самого блока QAM-Modulator, поэтому данную зависимость рассматривать не будем. На рисунке 3.156 представлен график зависимости BER от SNR в каскадных кодах для видов модуляции BPSK, QPSK и QAM-64:

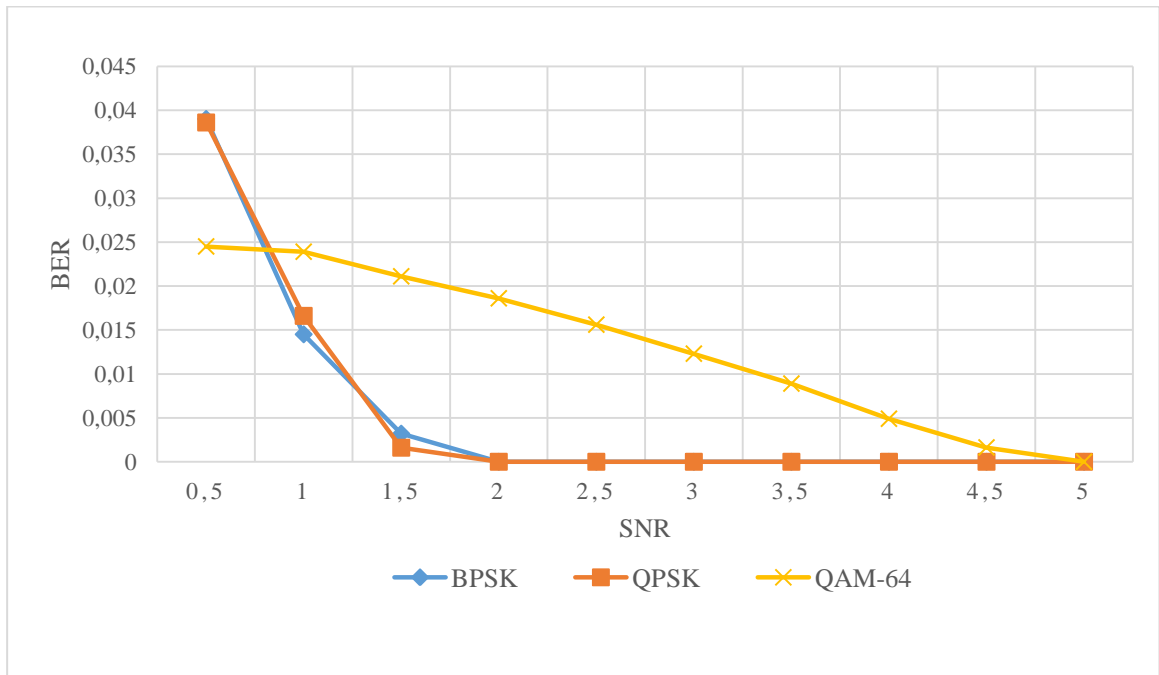


Рис. 16 – График зависимости BER от SNR для разных видов модуляции

На рисунке 17 представлена диаграмма созвездий QAM-64 сигнала на выходе передатчика:

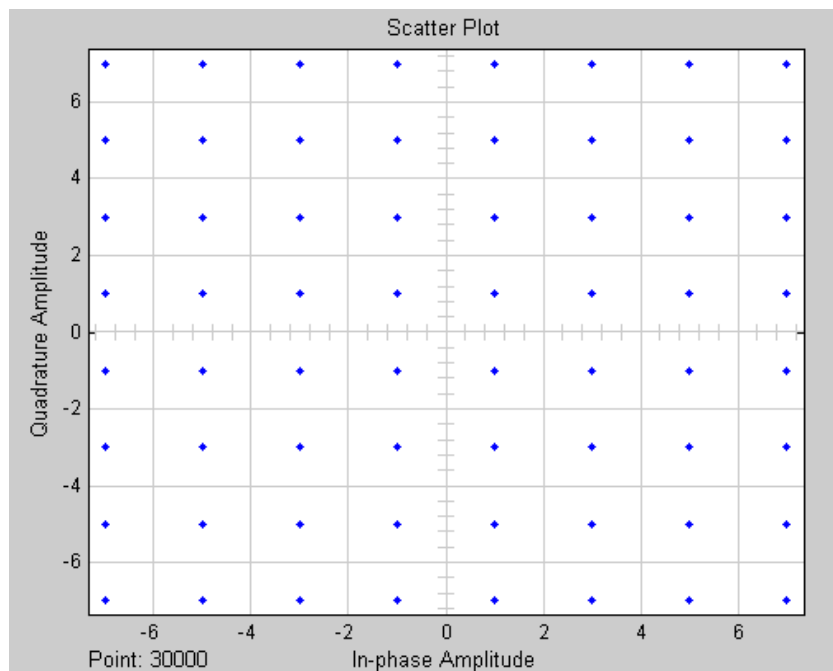


Рис. 18 - Диаграмма созвездий QAM-64 сигнала на выходе передатчика

На рисунке 19 представлена диаграмма созвездий QAM-64 сигнала на приёмном конце после канала с шумом (SNR = 3 дБ) :

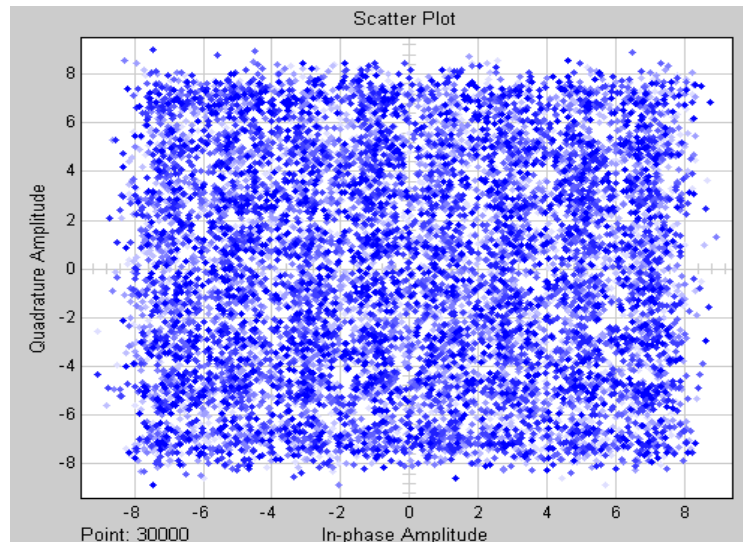


Рис. 16 - Диаграмма созвездий QAM-64 сигнала на входе приёмника

На рисунке 17 представлена диаграмма созвездий QAM-64 сигнала после исправления ошибок каскадным декодером (SNR = 3 дБ) :

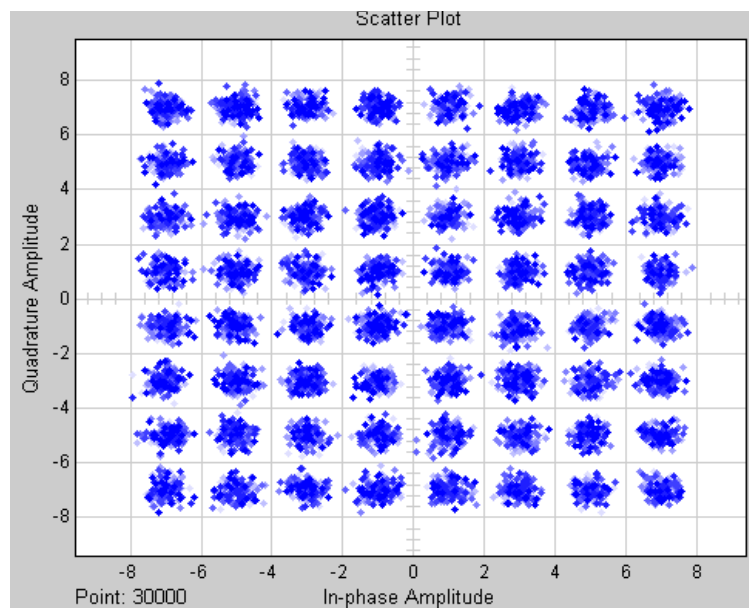


Рис. 17 - Диаграмма созвездий QAM-64 сигнала после декодирования

На рисунке 18 представлены временные формы сигнала QAM-64 с каскадным кодированием (SNR = 3 дБ) :

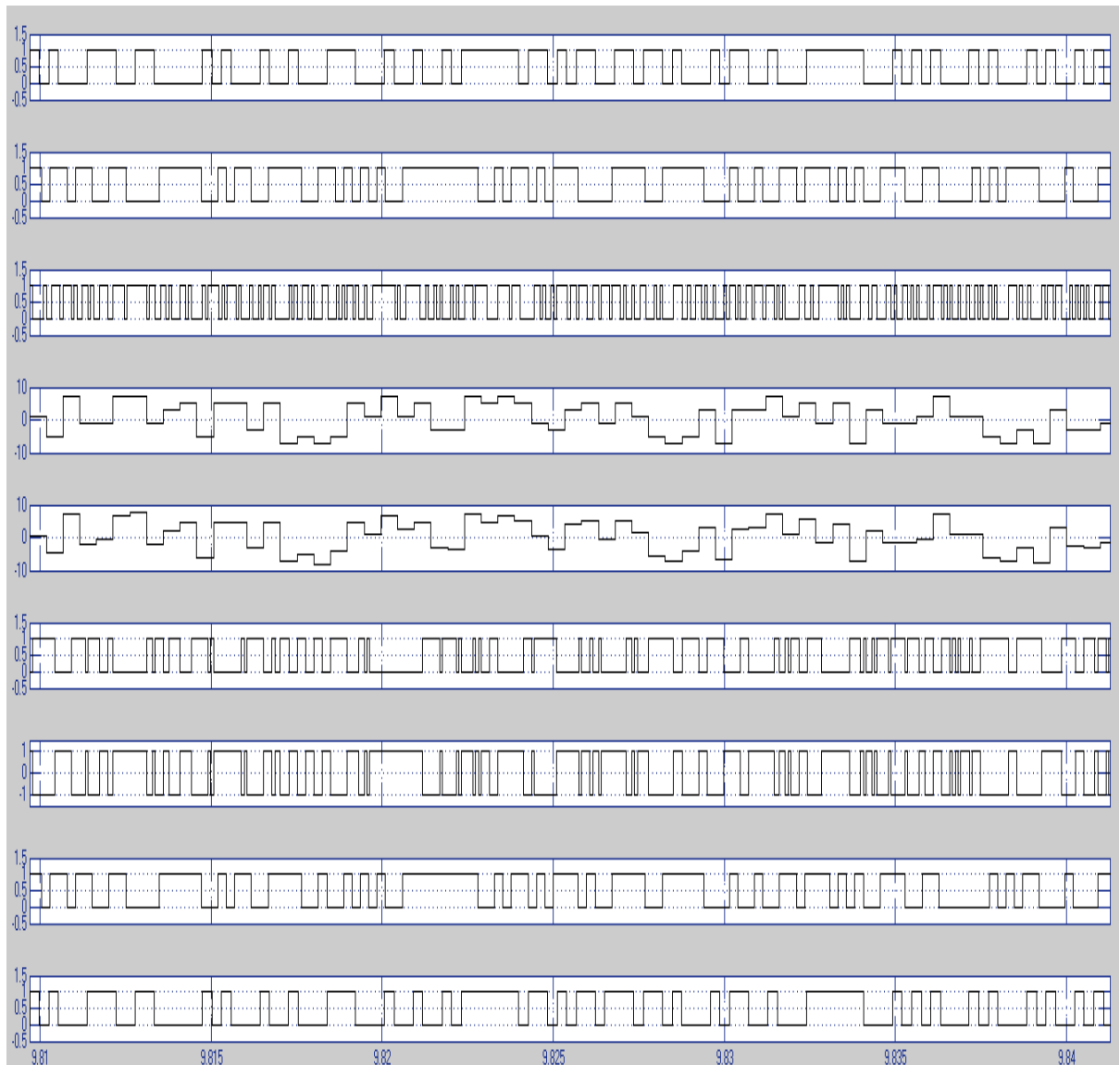


Рис. 18 - Временные формы сигналов (сверху вниз):

- 1) на выходе генератора псевдослучайной последовательности;
- 2) на выходе внешнего кодера (PC);
- 3) на выходе внутреннего кодера (турбо-кодера);
- 4) на выходе QAM-модулятора;
- 5) на входе QAM-демодулятора;
- 6) на выходе QAM-демодулятора;
- 7) на выходе преобразователя сигнала из однополярного в биполярный;
- 8) на выходе внутреннего декодера (турбо-декодера);
- 9) на выходе внешнего декодера (PC).

На рисунке 19 представлен график зависимости BER от SNR при модуляции QAM-64 для каскадного кода, внешнего кода и внутреннего кода:

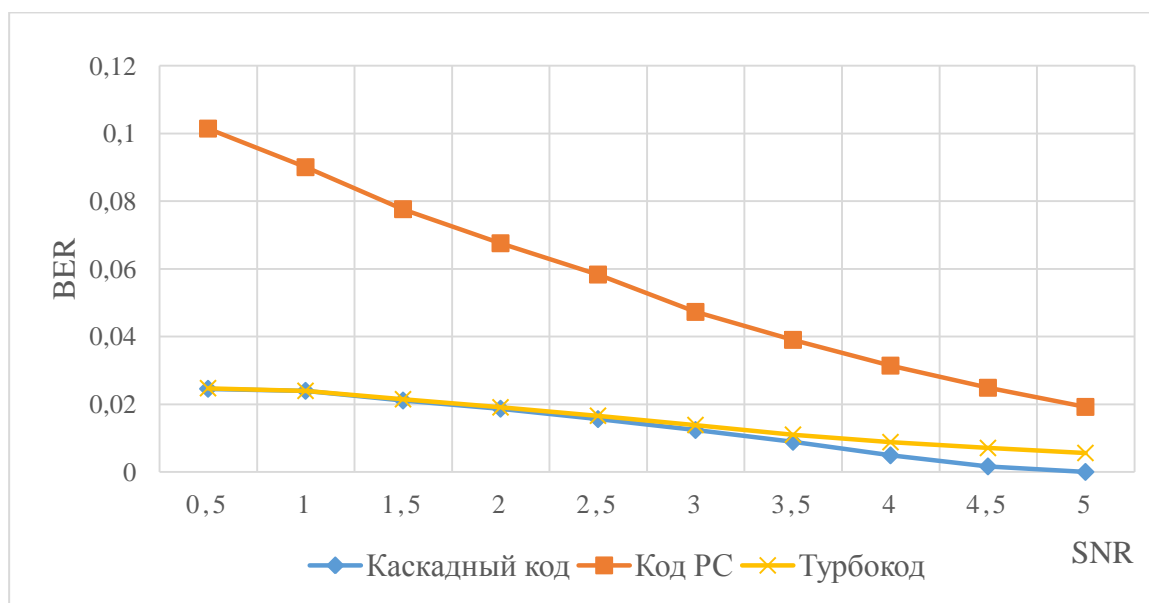


Рис. 19 - График зависимости BER от SNR для каскадного кода, кода Рида-Соломона и турбокода

Как видно из рисунка 19, применение каскадного кодирования неоправданно по сравнению с применением простого турбокодирования, однако он имеет гораздо лучшую характеристику, чем применение простого помехоустойчивого кодирования (РС). Модель позволяет исследовать работу каскадных кодов. В качестве внешнего кода используется код Рида-Соломона, в качестве внутреннего – Турбо-код на базе свёрточного кодирования и треллис-модуляции. Данная модель позволяет исследовать зависимость битовой вероятности ошибки (BER) системы от отношения сигнал/шум (SNR) в канале.

ЛИТЕРАТУРА

1. Голиков А.М. Модуляция, кодирование и моделирование в телекоммуникационных системах. Теория и практика: Учебное пособие / А.М. Голиков. - СПб.: Издательство «Лань», 2018. – 452с.