

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ  
КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет  
имени К.И. Сатпаева

Институт промышленной автоматизации и цифровизации  
имени А. Буркитбаева

Кафедра «Электроника, телекоммуникации и космические технологии»

Базарбай Самал Исембайқызы

Анализ помехоустойчивости систем передачи с применением кодирования

**ДИПЛОМНАЯ РАБОТА**

специальность 5В071900 – Радиотехника, электроника и телекоммуникация

Алматы 2020

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет  
имени К.И. Сатпаева

Институт промышленной автоматизации и цифровизации  
имени А. Буркитбаева

Кафедра «Электроника, телекоммуникации и космические технологии»

**ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ**  
Заведующий кафедрой ЭТиКТ  
\_\_\_\_\_ И.Сыргабаев  
“ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2020г

**ДИПЛОМНАЯ РАБОТА**

На тему: Анализ помехоустойчивости систем передачи с применением кодирования

по специальности 5В071900 – Радиотехника, электроника и телекоммуникация

Выполнила

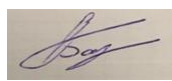
Базарбай С.И.

Рецензент

Научный руководитель

канд. техн. наук, профессор АУЭС

маг-р техн. наук



Байкенов А.С.



Байкенова Г.М.

“ \_\_27\_\_ ” \_\_\_\_\_05\_\_\_\_2020г.

“ \_\_27\_\_ ” \_\_\_\_\_05\_\_\_\_2020г.

Алматы 2020



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет  
имени К.И. Сатпаева

Институт промышленной автоматизации и цифровизации  
имени А. Буркитбаева

Кафедра «Электроника, телекоммуникации и космические технологии»

5В071900 – Радиотехника, электроника и телекоммуникация

**УТВЕРЖДАЮ**

Заведующий кафедрой ЭТиКТ

И. Сыргабаев

“ \_\_\_\_ ” “ \_\_\_\_ ” 2020г

**ЗАДАНИЕ**

**на выполнение дипломной работы**

Обучающемуся Базарбай Самал Исембайқызы

Тема Анализ помехоустойчивости систем передачи с применением кодирования

Утверждена приказом Ректора Университета № 762-б от “27” января 2020г.

Срок сдачи законченной работы “5” июня 2020г.

Исходные данные к дипломной работе:

Выполнить анализ помехоустойчивых кодов для уменьшения числа ошибок в канале связи. Государственный стандарт РК в области информационных технологий – 35.040 Наборы знаков и кодирование информации.

Перечень подлежащих разработке в дипломной работе вопросов:

- а) Анализ влияния помех на передачу информации в сетях связи;
- б) Примеры и анализ эффективности современных помехоустойчивых кодов в телекоммуникационных системах: Коды Рида Соломона; Сверточные коды; Турбокоды;
- в) Модель реализации турбокода.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей): Классификация аддитивных помех, Структурная схема СПДИ, Классификация помехоустойчивых кодов, Структурная схема кодера кода Рида-Соломона, Схема работы декодера кода Рида-Соломона, Решетчатая диаграмма декодера Витерби, Общая структурная схема турбо-кодера.

Рекомендуемая основная литература:

1) Цифровая связь. Бернард Скляр. Теоретические основы и практическое применение. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 1104 с.

2) Введение в теорию помехоустойчивого кодирования. Давыдов А.В., Мальцев А.А. - Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2014. – 123 с.

3) Телемеханика. Н. Тутевич. Учебное пособие для вузов. – М.: Высшая школа, 1985. – 423 с.

4) Помехоустойчивость и эффективность систем передачи информации. А.Г. Зюко, А.И. Фалько, Л.В. Банкет. – М.: Радио и связь, 1985. – 272 с.

5) Модуляция, кодирование и моделирование в телекоммуникационных системах. Теория и практика: учебное пособие. - А.М. Голиков. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2016. – 516 с.

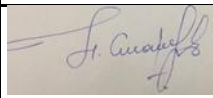
## ГРАФИК

подготовки дипломной работы

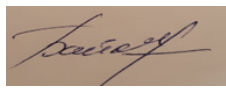
Наименования разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю и консультантам	Примечание
Анализ влияния помех на передачу информации в сетях связи	10.01.2020	выполнила
Примеры и анализ эффективности современных помехоустойчивых кодов в телекоммуникационных системах	15.03.2020	выполнила
Модель реализации турбо-кода	12.04.2020	выполнила

### Подписи

консультантов и нормоконтролера на законченную дипломную работу (проект) с указанием относящихся к ним разделов работы (проекта)

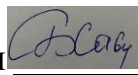
Наименования разделов	Консультанты, И.О.Ф. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Нормоконтролер	Доктор PhD Смайлов Н.К.	25.05.2020	

Научный руководитель



Байкенова Г.М

Задание принял к исполнению обучающийся



Базарбай С.И.

Дата

"\_\_27\_\_" \_\_01\_\_2020г.

## АННОТАЦИЯ

Дипломная работа на тему «Анализ помехоустойчивости систем передачи с применением кодирования».

Дипломная работа состоит из введения, трех глав, заключения, а также списка литературы, которая была использована во время написания дипломной работы.

Целью дипломной работы является проведение сравнительного анализа эффективности современных помехоустойчивых кодов.

В дипломной работе проводится сравнительный анализ таких помехоустойчивых кодов как сверточные коды, коды Рида-Соломона и турбокоды. Для проведения анализа используется программа Simulink, которая входит в состав Matlab.

За счет сравнительного анализа и реализованных проектов, выбран эффективный метод помехоустойчивого кодирования.

## АҢДАТПА

Дипломдық жұмыс тақырыбы «Кодалау негізінде жүйенің бөгеуілге қарсы анализі».

Дипломдық жұмыс кіріспеден, үш бөлімнен, қорытындыдан, сондай-ақ дипломдық жұмысты жазу кезінде пайдаланылған әдебиеттер тізімінен тұрады.

Дипломдық жұмыстың мақсаты кедергіге төзімді заманауи кодтарының тиімділігіне салыстырмалы талдау жүргізу болып табылады.

Дипломдық жұмыста жинақтау, Рид-Соломон және турбо кодтары сияқты қателіктерді түзету кодтарының арасында салыстырмалы талдау жасалды. Талдау жүргізу үшін Matlab құрамына кіретін Simulink бағдарламасы қолданылады.

Салыстырмалы талдау мен іске асырылған жобалардың арқасында кедергіге төзімді кодтаудың тиімді әдісі таңдалды.



## ANNOTATION

Thesis topic is "Analysis of noise immunity of transmission systems using coding".

The thesis consists of an introduction, three chapters, conclusion, and a list of literature that was used during the writing of the thesis.

The purpose of the thesis is to conduct a comparative analysis of the effectiveness of modern noise-resistant codes.

The thesis provides a comparative analysis of such noise-resistant codes as convolutional codes, Reed-Solomon codes and turbo codes. The Simulink program, which is part of Matlab, is used for the analysis.

As a result of comparative analysis and implemented projects, an effective method of noise-tolerant encoding was selected.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение	10
1 Анализ влияния помех на передачу информации в сетях связи	11
1.1 Классификация помех в телекоммуникационных системах	11
1.2 Методы защиты от помех	15
1.3 Классификация помехоустойчивых кодов и методов кодирования	16
1.4 Постановка задач	20
2 Примеры и анализ эффективности современных помехоустойчивых кодов в телекоммуникационных системах	21
2.1 Коды Рида – Соломона	21
2.2 Сверточные коды	24
2.3 Турбо-коды	29
2.4 Сравнительный анализ эффективности современных помехоустойчивых кодов	31
3 Модель реализации турбо-кода	43
Заключение	48
Список использованной литературы	49

## ВВЕДЕНИЕ

Помехоустойчивое кодирование занимает важное место в современных системах связи. Все эти системы используют для передачи беспроводные каналы, в которых на сигнал действуют помехи различной физической природы. Это приводит к тому, что принятые данные с большой вероятностью содержат ошибки, что для многих приложений недопустимо. В результате возникает задача обеспечения надежной передачи цифровой информации по каналам с помехами.

На сегодняшний день известно множество кодов и методов их декодирования, которые различаются сложностью реализации и рядом других параметров, следовательно, сохраняют актуальность исследования.

Многообразие существующих кодов делится на два класса: блочные коды и непрерывные коды.

В блочных кодах передаваемая информационная последовательность разбивается на отдельные блоки с добавлением к каждому блоку определенного числа проверочных символов. Кодовые комбинации кодируются и декодируются независимо друг от друга.

В непрерывных кодах, передаваемая информационная последовательность не разделяется на блоки, а проверочные символы размещаются в определенном порядке между информационными. Процессы кодирования и декодирования также осуществляются в непрерывном режиме.

Данная дипломная работа посвящена сравнительному анализу эффективности помехоустойчивых кодов.

Для проведения анализа мы будем использовать из блочных кодов коды Рида-Соломона и турбокоды, а из непрерывных сверточные коды, так как они являются более современными методами кодирования. Также были выбраны и составлены оптимальные модели в MATLAB, произведено моделирование.

## 1 Анализ влияния помех на передачу информации в сетях связи

В электрических цепях очень редко встречаются полезные сигналы в их чистом виде. Потому что на них всегда влияет помеха и шум. Так как полезный сигнал искажается при передаче, выходное сообщение выводится с некоторыми ошибками. Причиной этих ошибок являются как искажения, которые вносятся самим каналом, так и различного вида помехи, которые воздействуют на сигнал при его передаче. В зависимости от вида информации помехи в основном проявляются: в виде ошибок при передаче телеграмм, сообщений и передаче данных; в виде шорохов, тресков, в плохой разборчивости речи абонентов и слышимости разговоров, ведущихся по соседним каналам, при телефонной связи; в недостаточной чёткости штрихов и появлении ненужных штрихов при передаче фототелеграмм и газетных полос, в искажении команд в системах телемеханики и телесигнализации и т.д.

### 1.1 Классификация помех в телекоммуникационных системах

Помеха – это любое воздействие, которое влияет на полезный сигнал и затрудняет его прием. Помехи весьма отличаются как по своему происхождению, так и по физическим свойствам.

По характеру воздействия на сигнал различают:

- мультипликативные помехи;
- аддитивные помехи.

Мультипликативной называется помеха, мгновенные значения которой перемножаются с мгновенными значениями сигнала.

$$z(t) = k(t) \cdot u(t), \quad (1.1)$$

где  $k(t)$  – случайный процесс;

$u(t)$  – полезный сигнал (реализация случайного сигнала на выходе модулятора).

Мультипликативная помеха выражается в изменении характеристик линии связи (ЛС) (сопротивление ЛС, частота среза ЛС, нелинейность характеристик ЛС). Пока не существует стандартных способов компенсации мультипликативной помехи. Величина помехи зависит от качества средств канала связи и качества обслуживания.

Аддитивной называется помеха, мгновенные значения которой складываются с мгновенными значениями сигнала. Влияние аддитивного сопротивления определяется суммированием полезного сигнала. Аддитивные помехи действуют на приемник независимо от сигнала и даже появляются при отсутствии сигнала на входе приемника.

Во всех системах связи можно отображать обнаруженный сигнал, поступающий на вход приемника (демодулятора) от выхода канала, в виде суммы:

$$z(t) = s(t) + n(t), \quad (1.2)$$

где  $z(t)$  – реализация суммы сигнала и аддитивной помехи на входе приемника (детектора);

$s(t)$  – реализация случайного сигнала на входе приемника (детектора) без учета аддитивных помех;

$n(t)$  – реализация случайного процесса (СП)  $N(t)$ ;

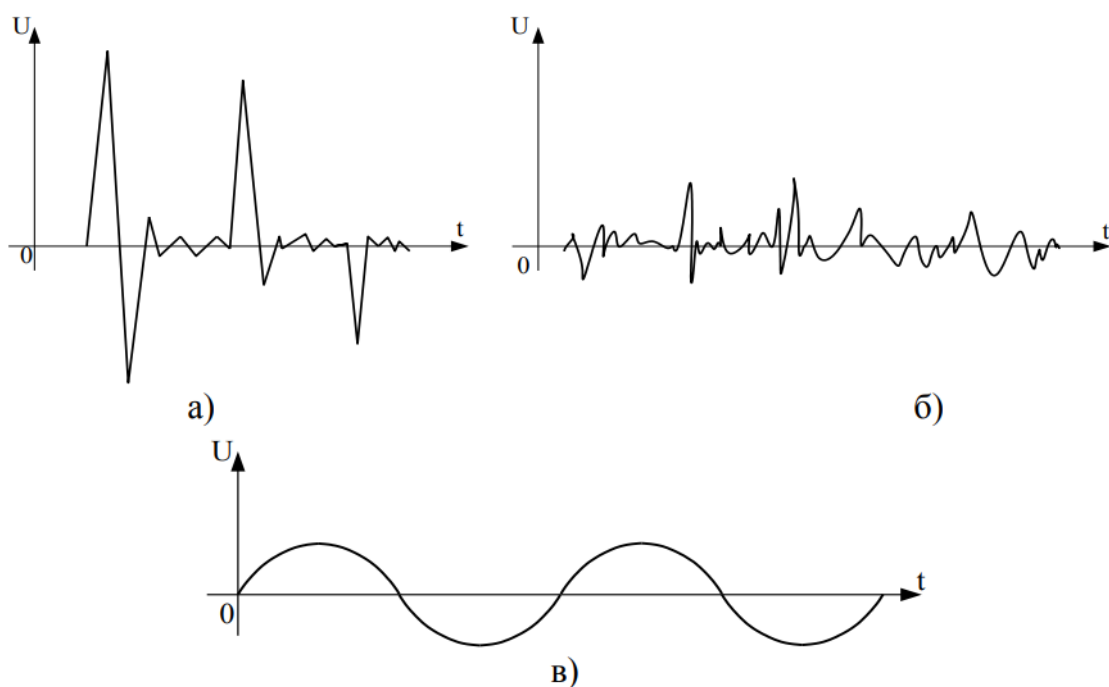
$N(t)$  – случайная аддитивная помеха в непрерывном канале.

Аддитивная помеха не зависит от ЛС и определяется внешними воздействиями на среду передачи сигналов. Влияние помех на передаваемый сигнал имеет аддитивный характер. Поэтому будем рассматривать только аддитивные помехи. [3 – с 128]



Рисунок 1.1 - Классификация аддитивных помех

По типу аддитивные помехи (см. рис. 1.1) можно разделить на сосредоточенные во времени (импульсные), флуктуационные и гармонические (сосредоточенные по частоте).



а – импульсные; б – флуктуационные; в – гармонические  
 Рисунок 1.2 - Типы аддитивных помех

К сосредоточенным по времени (импульсным) помехам (см. рис. 1.2.а) относят помехи в виде одиночных импульсов, которые следуют один за другим через такие большие промежутки времени, что при поступлении переходные явления в радиоприемнике от одного импульса до прихода следующего импульса в целом успевают затухнуть. В общем случае импульсные помехи представляют собой последовательность импульсов со случайными амплитудой, длительностью и моментами появления отдельных импульсов.

Среди аддитивных помех значимое место занимает флуктуационная или гладкая помеха (см. рис. 1.2.б), которая имеет вид непрерывного случайно изменяющегося колебания. Флуктуационные помехи не имеют постоянной составляющей. Практически этот вид помех имеет место во всех реальных каналах.

Электрическую структуру флуктуационной помехи можно считать последовательностью бесконечных коротких импульсов, которые имеют случайную амплитуду и сопровождаются случайным интервалом времени. В этом случае импульсы очень часто появляются друг за другом, поэтому переходные явления в приемнике от отдельных импульсов накладываются и формируют случайный непрерывный процесс.

Таким образом, можно сказать, что источником шума в электрических цепях могут быть флуктуации тока, которые обусловлены дискретной природой носителей заряда (электронов, ионов).

Флуктации, которые обусловлены тепловым движением, являются наиболее распространенной причиной шума.

Сосредоточенные по спектру помехи (см. рис. 1.2.в). К этому виду помех в основном относятся сигналы, которые выделяются посторонними радиостанциями, также можно отнести излучения генераторов высокой частоты различного назначения и т. п. В отличие от флуктуационных и импульсных помех, спектр которых заполняет частотный диапазон приёмника, сосредоточенная помеха в большинстве случаев имеет ширину спектра чем полоса пропускания самого приемника. В диапазоне коротких волн сосредоточенные помехи являются основными помехами, которые определяют помехоустойчивость связи.

В зависимости от источника возникновения и от характера их воздействия помехи подразделяются на внутренние помехи канала связи и внешние помехи, которые выделяются от посторонних электромагнитных полей.

К внутренним помехам, которые возникают в самом канале, относятся: флуктуационные шумы входных каскадов приемника, линий передачи сигналов от передатчика к приемнику и т.д.; электрические сигналы, которые попадают в приемник из-за плохого экранирования между каскадами и блоками аппаратуры. Флуктуационные шумы содержат тепловую и дробовую составляющие. Тепловой шум возникает из-за теплового движения носителей заряда. Дробовой шум обусловлен дискретной природой носителей заряда и возникает на выходах полупроводниковых приборов.

В диапазоне оптических частот к тепловым и дробовым шумам добавляется квантовый шум, который возникает в результате преобразования в электрический ток оптического сигнала и обусловлен дискретной природой этого преобразования.

Внутренние шумы являются источниками флуктуационных помех, которые поэтому принципиально неустраняемы, нужно лишь как-то ограничивать их.

Наибольшее влияние на канал связи оказывают внешние шумы. Внешние помехи делятся на промышленные, радиопомехи, атмосферные и космические, главнейшими из которых являются промышленные (искусственные) и атмосферные (естественные). Промышленные помехи создаются в результате влияния электромагнитных полей различных электронных устройств: линии электропередачи, электрооборудование промышленных предприятий, контактных сетей электрифицированного транспорта (трамвая, троллейбуса). Основной причиной этих помех является искрообразование, связанное с резким прерыванием тока в электрических цепях в процессе их коммутации. Помехи создаются также линиями электропередачи, которые при отсутствии экранирования являются своего рода антеннами. Промышленные помехи могут носить флуктуационный или импульсный характер; они проникают в устройства через антенну, цепи питания, емкостные и индуктивные связи. На воздушные линии связи помехи наводятся от линий высокого напряжения. [3 – с 129]

Атмосферные помехи возникают в результате физических процессов, протекающих в земной атмосфере. Мощным источником этих помех являются

грозовые разряды, излучение которых сказывается практически во всем радиодиапазоне.

Радиопомехи возникают от излучения радиостанций различного назначения.

Космические помехи оказывают влияние на системы радиосвязи, работающие на частотах более 30 МГц. Источниками этих помех являются Солнце, радиозвезды, межзвездные газы.

## **1.2 Методы защиты от помех**

В настоящее время существуют несколько методов защиты от помех. В основном их подразделяют на два вида: технические методы защиты от помех и метод защиты от помех с помощью кодирования.

К техническим методам защиты от помех относятся: экранирование, заземление, фильтрация, изоляция и т.д.

Экранирование в электротехнике и радиотехнике, это способ снижения (подавления либо ослабления) влияния внешних паразитных электромагнитных полей, помех и наводок, которые мешают работе электро- и радиотехнических установок, аппаратуры передачи и обработки данных и т.п. Экранирование осуществляют с помощью заземлённого металлического или металлизированного экрана с высокой электрической или магнитной проводимостью, в который заключают либо источник паразитных полей (помех), либо само защищаемое устройство, либо его отдельные элементы. В зависимости от необходимой степени экранирования применяют экраны сплошные (обычно из листовой стали) или сетчатые (сплетённые из медной или стальной проволоки). В ряде случаев роль экрана выполняет металлический кожух устройства. Для сложных и громоздких установок часто применяют общее экранирование помещений (камер), внутри которых они находятся.

Заземление в радиотехнике — это электрическое соединение земли с антеннами радиопередатчиков средних и длинных волн. Данный вид заземления позволяет использовать землю с большой ёмкостью и несимметричный вибратор. В этот момент возбуждение колебаний в антенне приводит к потере энергии в земле. В радиовещательных станциях с металлическими излучателями заземление выполняется в виде сети проводов, которые расходятся от основания мачты. В свое время М. В. Шулейкин установил линейную зависимость сопротивления потерь от длины радиоволн. Для получения малой величины потерь в земле лучи радиотехнического заземления могут иметь длину до 0,5 рабочей длины волны радиопередатчика, а их общее количество может составлять 120.

Фильтром называется пассивный четырехполюсник, пропускающий электрические сигналы некоторой полосы частот без существенного ослабления или с усилением, а колебания вне этой полосы частот - с большим ослаблением.



Такие устройства применяются для выделения полезных сигналов на фоне помех.

Изоляция в электротехнике — элемент конструкции оборудования, препятствующий прохождению через него электрического тока.

Изоляция электрическая предназначена для предотвращения образования электрического контакта между частями электротехнической установки, находящимися под различными электрическими потенциалами. Изоляция электрическая характеризуется электрической прочностью, объёмным и поверхностным электрическими сопротивлениями, диэлектрическими потерями, нагрево- и морозостойкостью, механической прочностью и др.

Вторым методом защиты от помех является помехоустойчивое кодирование.

Под кодированием понимается процесс представления определённых данных с помощью ограниченного набора представлений — символов. Кодовые комбинации образуются по некой наперёд заданной совокупности правил кодирования. Данная совокупность образует так называемую систему кодирования. Обратное преобразование информации называется декодированием.

Помехоустойчивое кодирование — кодирование, предназначенное для передачи данных по каналам с помехами, обеспечивающее исправление возможных ошибок передачи вследствие помех.

### **1.3 Классификация помехоустойчивых кодов и методов кодирования**

Код — совокупность условных сигналов, обозначающих дискретные сообщения. Кодовая последовательность (комбинация) — представление дискретного сигнала.

Кодирование — преобразование дискретного сообщения в дискретный сигнал, осуществляемое по определенному правилу. Необходимость кодирования возникает, прежде всего, из потребности приспособить форму сообщения к данному каналу связи или к какому-либо другому устройству, предназначенному для преобразования или хранения информации.

Типичная структурная схема системы передачи дискретной информации (СПДИ) приведена на рис. 1.3. Источник вырабатывает сообщения, которые необходимо передавать по каналу СПДИ. Это могут быть последовательности дискретных сообщений (данные, телеграфные сообщения и т.д.) либо непрерывные сообщения (речь, телевидение, результаты телеизмерений и др.), преобразованные в цифровую форму. Реальные сообщения содержат избыточность и для согласования источника с каналом передачи информации используют кодер источника. Совместно с декодером они образуют кодек источника. Устройства или программные средства, которые осуществляют кодирование и декодирование кодов называются кодеками. Для построения

кодека необходимы такие элементы как: регистры сдвига, логические элементы и ключи.

Основная задача любой СДПИ – передача информации с заданными верностью и скоростью передачи. Эти требования находятся в противоречии, причем, повышение скорости передачи информации в реальных СПДИ приводит к снижению помехоустойчивости и верности передачи.

Корректирующие коды – это коды, позволяющие обнаруживать или исправлять ошибки, возникающие при передаче сообщений по каналам связи.

С этой целью в структуру КК вводится избыточность. Кодек КК (кодер и декодер канала) приведены на рис.1.3. В реальных условиях длина кода ограничена допустимой сложностью устройств кодирования и, прежде всего, декодирования, поэтому эффект от применения корректирующих кодов зависит от параметров кода и ограничений на реализацию кодека канала. Современная теория предлагает широкий набор корректирующих кодов, различных по структуре, принципам построения и корректирующей способности. В последующих разделах рассмотрены классы кодов, для которых разработаны достаточно простые и эффективные алгоритмы кодирования/декодирования и которые наиболее перспективны для использования в каналах телекоммуникационных систем.

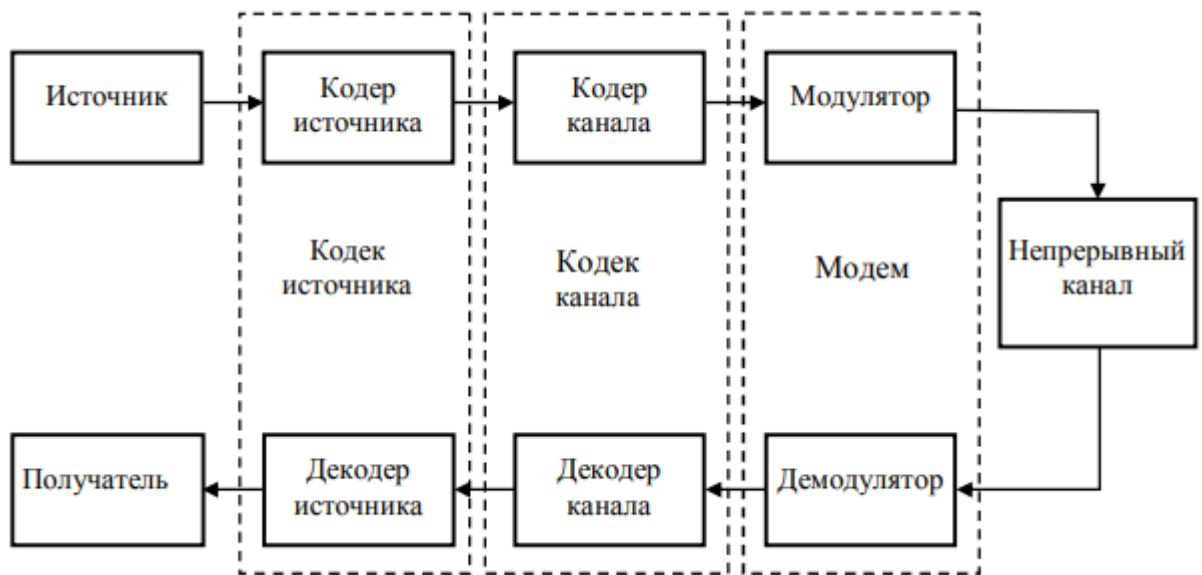


Рисунок 1.3 – Структурная схема СПДИ

Целями кодирования сообщений являются:

- 1) передача по общему каналу связи нескольких или многих сообщений для кодового разделения сигналов;
- 2) повышение помехоустойчивости и достоверности передачи сообщений;
- 3) более экономное использование полосы частот канала связи, т.е. уменьшение избыточности;
- 4) уменьшение стоимости передачи и хранения сообщений;

- 5) обеспечение скрытности передачи и хранения информации;
- 6) преобразование любой информации независимо от ее происхождения и назначения в единую систему символов;
- 7) приведение исходных символов в соответствие с характеристиками канала связи [3].

При кодировании происходит процесс преобразования элементов сообщения в соответствующие им числа (кодовые символы). Каждому элементу сообщения присваивается определенная совокупность кодовых символов, которая называется кодовой комбинацией. Совокупность кодовых комбинаций, обозначающих дискретные сообщения, образует код.

К основным параметрам помехоустойчивых кодов относятся:  $n$  - длина кодовой комбинации,  $k$  – информационные символы,  $m$  – контрольные символы,  $d$  – кодовое расстояние,  $w$  – вес кода.

$$n = k + m$$

Весом кода  $w$  называется количество единиц в кодовой комбинации. Число одноименных разрядов двух кодовых комбинаций, в которых значения символов не совпадают, есть кодовое расстояние  $d$  между этими комбинациями. Для определения кодового расстояния необходимо сложить эти комбинации по модулю 2. Кодовое расстояние  $d$  определенного кода – это минимальное число элементов, которыми любая кодовая комбинация отличается от другой (по всем парам кодовых слов).

Помехоустойчивое кодирование позволяет обнаруживать и исправлять ошибки, возникающие при передаче сообщения по каналу связи. Помехоустойчивое кодирование осуществляется за счет введения в состав передаваемых кодовых слов достаточного большого объема избыточной информации (например, в форме проверочных символов). Операцию введения избыточности для повышения помехоустойчивости называют канальным кодированием.



## Рисунок 1.4 – Классификация помехоустойчивых кодов

Помехоустойчивые коды делятся на блочные коды и непрерывные коды.

Блочными называются коды, в которых сообщения делятся на отдельные блоки и для каждого блока процессы кодирования то есть формирования проверочных символов и декодирования, то есть обнаружение и исправление ошибок осуществляется независимо от остальных блоков, в определенной последовательности, по существующим алгоритмам.

Блочный код является кодом без памяти. Кодер блочного кода представляет собой некую таблицу соответствий, на входе этого кодера поступают сообщения из  $k$  битов, а на выходе мы получаем комбинацию из  $n$  битов, которая больше чем  $k$ . Понятие «без памяти» означает, что каждый блок из  $n$  символов зависит только от соответствующего блока из  $k$  символов и не зависит от других блоков.

Следует отметить, что блочные коды были изучены и предложены раньше, во время развития теории кодирования.

Непрерывные коды образуют последовательность символов, которые нельзя разделить на отдельные кодовые комбинации. Чаще всего используются линейные древовидные коды, которые называются сверточными. Сверточные коды по характеристикам превосходят блочные коды, поэтому находят широкое применение в телекоммуникационных системах. Кодер непрерывного кода является устройством с памятью. На вход поступают наборы из  $k$  входных информационных символов, а на выходе появляются наборы из  $n$  кодовых символов. Каждый набор  $n$  кодовых символов зависит от текущего входного набора и от  $v$  предыдущих входных символов. Кодирование и декодирование выполняются непрерывно по последовательности символов без деления их на блоки.

Также стоит отметить, что непрерывные коды характеризуются скоростью кода:  $R=k/n$ .

Одна из особенностей непрерывных кодов - исходная последовательность символов, несущих информацию, непрерывно преобразуется в другую последовательность, состоящую из числа избыточных символов в соответствии с определенным законом.

Блочные коды - это обширная группа кодов, исправляющих ошибки, в которых каждое сообщение передается строго установленным набором символов. В зависимости от метода деления проверочных знаков, эти коды подразделяются на делимые и неделимые.

В делимых кодах всегда можно отличить информационные символы, которые содержат передаваемую информацию и контрольные (проверочные) символы, которые являются избыточными и всегда служат для исправления ошибок.

В неразделимых кодах отсутствует четкое разделение информационной комбинации на информационные и проверочные символы.

К наибольшей категории разделимых кодов относятся линейные коды. Их главная особенность – контрольные символы формируются в виде линейной комбинации информационных символов. Линейные блочные коды, также в свою очередь, подразделяются на несистематические и систематические. К наибольшей категории разделимых кодов относятся систематические коды. Их главная особенность в том, что проверочные символы формируются как линейные комбинации информационных символов.

Одним из разновидностей систематических кодов являются циклические коды. Кроме всех свойств систематического кода, циклические коды имеют следующие свойства: если комбинация некоторых кодов относится к коду, то новая комбинация, полученная в результате циклической замены символов, также относится к этому коду.

К наиболее популярным систематическим кодам относятся коды Хэмминга, Боуза-Чоудхури-Хоквингема, Рида-Соломона, итеративный код, турбокоды, коды с проверкой на четность, коды Файра, Голея, Рида-Маллера и т.д.

#### **1.4 Постановка задач**

Моя дипломная работа посвящена анализу помехоустойчивости систем передачи с применением кодирования, которая позволяет определить более эффективный метод помехоустойчивого кодирования.

В работе будут приведены анализы сравнений более современных кодов, таких как, сверточные коды, коды Рида-Соломона и турбо-коды. Для этого надо решить следующие задачи: изучение влияния помех на передачу информации в сетях связи, изучение современных помехоустойчивых кодов, привести сравнительный анализ этих кодов с помощью программного обеспечения Simulink, которая входит в программу Matlab.

## 2 Примеры и анализ эффективности современных помехоустойчивых кодов в телекоммуникационных системах

Большую часть помехоустойчивых кодов в системах телекоммуникации занимают блочные коды. Линейные блочные коды предназначены для защиты от ошибок, то есть для обнаружения и исправления ошибок. Для кодирования применяется кодирующее устройство кодер. На него поступает  $k$  входных битов и на выходе получаем  $n$  выходных битов. Для проведения анализа мы будем использовать из блочных кодов коды Рида-Соломона и турбокоды, а из непрерывных сверточные коды, так как они являются более современными методами кодирования.

### 2.1 Коды Рида – Соломона

Коды Рида – Соломона — недвоичные блочные циклические коды, позволяющие исправлять ошибки в блоках данных. Недвоичные они, потому что элементами кодового слова являются не биты, а группы битов. В телевидении это — байты. Для восьмибитовых символов полная длина кодового слова составляет  $2^8-1 = 255$  символов, из них 239 информационных и 16 проверочных.

Кодирущик Рида-Соломона берет блок цифровых данных и добавляет дополнительные "избыточные" биты. Ошибки происходят при передаче по каналам связи или по разным причинам при запоминании (например, из-за шума или наводок, царапин на CD и т.д.).

Декодер Рида-Соломона обрабатывает каждый блок, пытается исправить ошибки и восстановить исходные данные. Число и типы ошибок, которые могут быть исправлены, зависят от характеристик кода Рида-Соломона.

Коды Рида-Соломона представляют собой линейные блочные коды. Код Рида-Соломона специфицируется как RS  $(n,k)$   $s$ -битных символов. Это означает, что кодирущик воспринимает  $k$  информационных символов по  $s$  битов каждый и добавляет символы четности для формирования  $n$  символьного кодового слова. Декодер Рида-Соломона может корректировать до  $t$  символов, которые содержат ошибки в кодовом слове, где  $2t = n-k$ . Диаграмма, представленная ниже, показывает типовое кодовое слово Рида-Соломона:

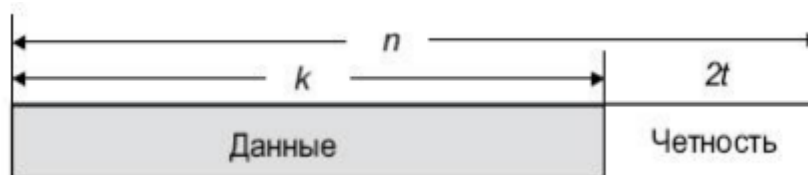


Рисунок 2.1 – Кодовое слово для кода Р-С

Популярным кодом Рида-Соломона является RS (255, 223) с 8-битными символами. Каждое кодовое слово содержит 255 байт, из которых 223 являются информационными и 32 байтами четности. Для этого кода  $n = 255$ ,  $k = 223$ ,  $s = 8$ ,  $2t = 32$ ,  $t = 16$ . Декодер может исправить любые 16 символов с ошибками в кодовом слове: то есть ошибки могут быть исправлены, если число искаженных байт не превышает 16. При размере символа  $s$ , максимальная длина кодового слова  $n$  для кода Рида-Соломона равна  $n = 2s - 1$ . Коды Рида-Соломона могут быть в принципе укорочены путем обнуления некоторого числа информационных символов на входе кодировщика (передать их в этом случае не нужно). При передаче данных декодеру эти нули снова вводятся в массив.

Код (255, 223), описанный выше, может быть укорочен до (200, 168). Кодировщик будет работать с блоком данных 168 байт, добавит 55 нулевых байт, сформирует кодовое слово (255, 223) и передаст только 168 информационных байт и 32 байта четности. Объем вычислительной мощности, необходимой для кодирования и декодирования кодов Рида-Соломона, зависит от числа символов четности. Большое значение  $t$  означает, что большее число ошибок может быть исправлено, но это потребует большей вычислительной мощности по сравнению с вариантом при меньшем  $t$ . Ошибки в символах одна ошибка в символе происходит, когда 1 бит символа оказывается неверным или, когда все биты неверны. Код RS(255,223) может исправить до 16 ошибок в символах. В худшем случае, могут иметь место 16 битовых ошибок в разных символах (байтах). В лучшем случае, корректируются 16 полностью неверных байт, при этом исправляется  $16 \cdot 8 = 128$  битовых ошибок. Коды Рида-Соломона особенно хорошо подходят для корректировки кластеров ошибок (когда неверными оказываются большие группы бит кодового слова, следующие подряд).

#### Декодирование.

Алгебраические процедуры декодирования Рида-Соломона могут исправлять ошибки и потери. Потерей считается случай, когда положение неверного символа известно. Декодер может исправить до  $t$  ошибок или до  $2t$  потерь. Данные о потере (стирании) могут быть получены от демодулятора цифровой коммуникационной системы, т.е. демодулятор помечает полученные символы, которые вероятно содержат ошибки. Когда кодовое слово декодируется, возможны три варианта.

1 Если  $2s + r < 2t$  ( $s$  ошибок,  $r$  потеря), тогда исходное переданное кодовое слово всегда будет восстановлено. В противном случае:

2 Декодер детектирует ситуацию, когда он не может восстановить исходное кодовое слово. Или же:

3 Декодер некорректно декодирует и неверно восстановит кодовое слово без какого-либо указания на этот факт. Вероятность каждого из этих вариантов зависит от типа используемого кода Рида-Соломона, а также от числа и распределения ошибок.

Коды Рида-Соломона базируются на специальном разделе математики – полях Галуа (GF) или конечных полях. Арифметические действия (+, -, x, / и т.д.)

над элементами конечного поля дают результат, который также является элементом этого поля. Кодировщик или декодер Рида-Соломона должны уметь выполнять эти арифметические операции. Эти операции для своей реализации требуют специального оборудования или специализированного программного обеспечения.

Кодовое слово Рида-Соломона формируется с привлечением специального полинома. Все корректные кодовые слова должны делиться без остатка на эти образующие полиномы. Общая форма образующего полинома имеет вид:

$$g(x) = (x - a^i)(x - a^{i+1}) \dots (x - a^{i+1+2t}), \quad (2.1)$$

а кодовое слово формируется с помощью операции:

$$c(x) = g(x) \cdot i(x), \quad (2.2)$$

где  $g(x)$  – образующим полиномом;

$i(x)$  – информационный блок;

$c(x)$  – кодовое слово, называемое простым элементом поля.

Алгоритм кодера  $2t$  символов четности в кодовом слове Рида-Соломона определяется следующим соотношением:

$$p(x) = i(x) \cdot x^{n-k} \bmod g(x), \quad (2.3)$$

На рис. 2.1 показана структурная схема кодера для RS(255,249):

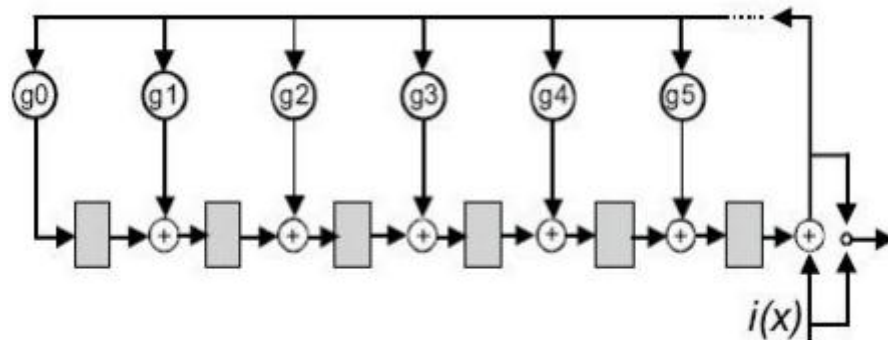


Рисунок 2.1 – Структурная схема кодера кода Рида Соломона

Каждый из 6 регистров содержит в себе символ (8 бит). В арифметических блоках выполняются операции умножения или сложения на символ, как на элемент конечного поля. Ниже на рисунке 2.2 представлена общая схема реализации декодирования кода Рида-Соломона. В ней даются следующие обозначения:

$r(x)$  – полученное кодовое слово;



$S_i$  – синдромы;  
 $L(x)$  – полином локации ошибок;  
 $X_i$  – положения ошибок;  
 $Y_i$  – значения ошибок;  
 $c(x)$  – восстановленное кодовое слово;  
 $v$  – число ошибок.

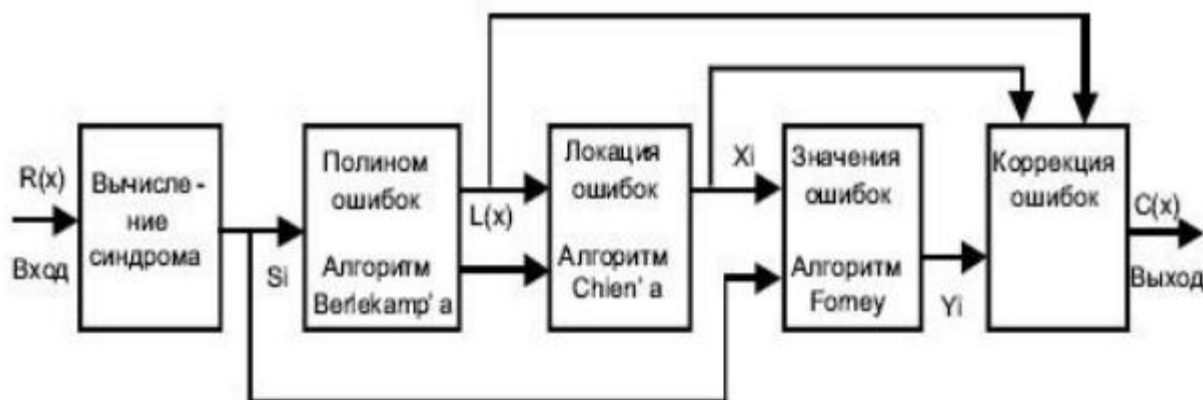


Рисунок 2.2 – Схема работы декодера кода Рида-Соломона

Полученное кодовое слово  $r(x)$  представляет собой сумму переданного кодового слова с ошибкой:

$$r(x) = c(x) + e(x), \quad (2.4)$$

где  $r(x)$  – кодовое слово;  
 $c(x)$  – исходное кодовое значение;  
 $e(x)$  – значение ошибки.

Декодирующее устройство Рида-Соломона вначале старается определить позицию и само значение ошибки для  $2t$  потерь и потом исправляет ошибки.

Синдром вычисляется аналогично вычислению четности. Наличие  $2t$  синдромов у кодового слова Рида-Соломона зависит только от ошибок и не зависит от передаваемых кодовых слов.

Синдромы можно вычислить способом подстановки  $2t$  корней образующего полинома  $g(x)$  в  $r(x)$ . А позиции символьных ошибок определяют при решении уравнений с  $t$  неизвестными.

## 2.2 Сверточные коды

Сверточный код — это корректирующий, непрерывный код, которые в отличие от блочных, обладают следующими преимуществами:

1) сверточные коды кодируют и декодируют потоки данных непрерывно во времени;

2) с применением сверточных кодов можно достичь очень высокой надежности передаваемой информации.

Сверточные коды используются, когда отношение сигнал-шум низкое, когда способность коррекции кодов блоков с разумной длиной блока недостаточна. Сверточное кодирование описывается более удобно, характеризуя действие соответствующего устройства кодирования.

Сверточные коды в последние десятилетия все чаще используются в различных системах помехоустойчивой передачи и надежного хранения информации. Среди важных применений сверточных кодов достаточно отметить их использование в модемах для телефонных линий и сотовой связи, в магнитных накопителях с высокой плотностью записи и в системах космической связи на большие расстояния.

Сверточный кодер представляет собой устройство, которое воспринимает за каждый такт работы в общем случае  $k$  входных информационных символов и выдающее на выход за тот же такт  $n$  выходных символов, которые подлежат передаче по каналу связи. Сверточный кодер обладает памятью в том значении, собственно что знаки на его выходе находятся в зависимости не лишь только от (очередного фрагмента) информационных знаков на входе, но и прошлых знаков, которые поступают на его вход. Иначе говоря, кодер представляет собой последовательную машину или же машину с конечным количеством состояний. Положение кодер ориентируется содержимым его памяти. Сверточный код формируется прохождением передаваемой информационной очередности сквозь линейный сдвиговый регистр с конечным количеством.

Отношение  $R = k/n$  называют относительной скоростью кода. Выходные символы, которые выводятся кодером на данном такте, зависят от  $k$  информационных символов, которые поступили на этом и предыдущем тактах.

Таким образом, выходные символы сверточного кодера однозначно определяются его входным сигналом и состоянием, также зависят от  $t-k$  предыдущих информационных символов. Главными составляющими сверточного кодера являются: регистр сдвига, сумматоры по модулю 2 и коммутатор.

Регистр сдвига является запоминающим устройством. На рисунке 2.3 показан регистр сдвига, в котором хранятся двоичные символы 0 или 1. Число ячеек  $m$  в регистре сдвига и определяет память кода. В момент поступления на вход регистра нового информационного символа символ, который хранится в крайнем правом разряде, выводится из регистра и сбрасывается. Каждый из остальных, хранящихся в регистре символов перемещается на один разряд вправо, освобождая тем самым крайний левый разряд, куда и поступает новый информационный символ.

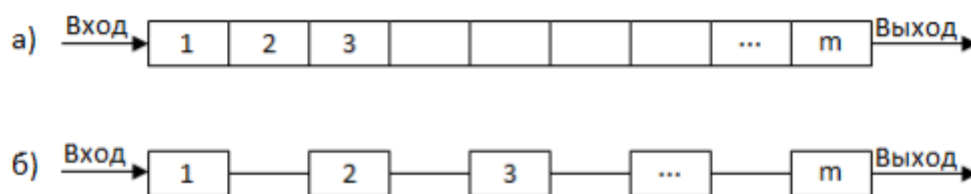


Рисунок 2.3 – Регистр сдвига

Сумматор по модулю 2 осуществляет сложение поступающих на его входы символов 0 и 1. Правило сложения по модулю 2 следующее: сумма двоичных символов равна 0, если число единиц среди поступающих на входы символов четно, и равна 1, если это число нечетно.

Коммутатор осуществляет последовательное считывание поступающих на его входы (контакты) символов и устанавливает на выходе очередность посылки кодовых символов в канал связи.

Аналогично блоковым кодам, сверточные коды также можно классифицировать на систематические и несистематические.

Систематическим сверточным кодом является такой код, для которого последовательность создавших его информационных знаков представляет собой выход кодовых знаков без изменения. В противном случае сверточный код считается несистематическим. формируется путем прямой последовательности данных с предельным числом через регистр линейной смены.

Мы рассмотрим сверточный кодер со скоростью кода  $1/2$ , на рисунке 2.4 представлена схема его кодера. В этом кодере каждый раз, информационный бит поступает на вход регистров сдвига, а на выходе генерируется два бита. В качестве примера рассмотрена ситуация, когда на вход кодера подается некая последовательность информационных символов  $m = 110101$ ,  $R = 1/2$ ,  $g_1 = 111$ ,  $g_2 = 101$ , а на выходе имеем последовательность  $U = 11\ 10\ 00\ 10\ 00\ 01$ .

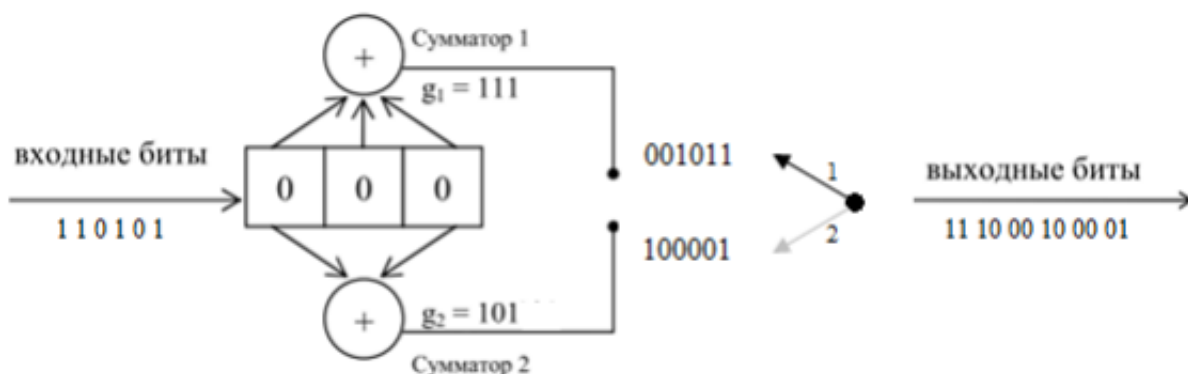


Рисунок 2.4 – Сверточный кодер с  $K=3$ ,  $R=1/2$

Старшие разряды входных информационных бит для удобства располагаются справа и поступают в регистр сдвига первыми. При поступлении на вход регистра одного бита, на выходах сумматора 1 и сумматора 2 образуется

по одному биту, которые в дальнейшем поочередно считываются коммутатором и образуют выходную последовательность.

Первый входной бит может быть 0 или 1. Соответствующие выходные биты – 00 или 11. Когда следующий бит входит в кодер, первый бит передвигается в следующую ячейку. Соответствующие выходные биты зависят от бита, переместившегося во вторую ячейку и нового входного бита. Следовательно, древовидная диаграмма для этого кода, показанная на рисунке 2.5, имеет две ветви на узел, соответствующие двум возможным входным символам. Жирной линией на рисунке 2.5 обозначен путь, по которому бы шел кодер, если бы входной комбинацией была последовательность 101.

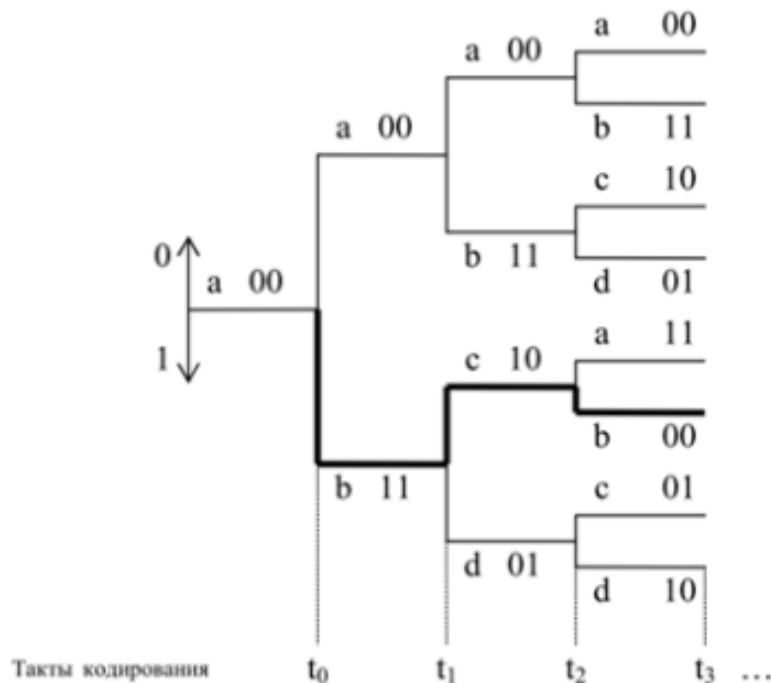


Рисунок 2.5 – Древовидная диаграмма для свёрточного кода, имеющего параметры  $K=3$ ,  $R=1/2$

Так как кодер имеет кодовое ограничение  $K=3$ , значит дерево начнёт повторяться после третьего шага. На рисунке 2.5 показано, что все ветви, которые исходят из узла, обозначенного а (состояния а) дают идентичные выходы. Путем слияния узлов, имеющих одинаковое название, мы получаем решётку, которая показана на рисунке 2.6. На нём жирной линией обозначен путь по которому бы шел кодер, если бы входной комбинацией была последовательность 1100, в таком случае на выходе имелась бы комбинация 11 01 01 11

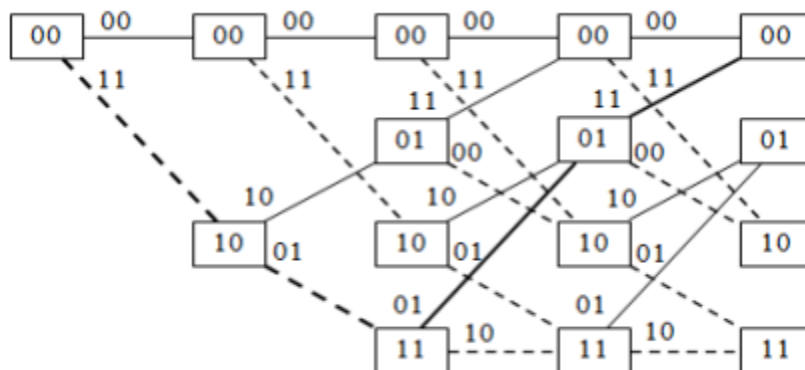


Рисунок 2.6 – Решётчатая диаграмма для сверточного кода, с параметрами  $K=3$ ,  $R=1/2$

Так как выход кодера определяем входом и состоянием кодера, еще более удобной чем решетка, считается диаграмма состояний.

Диаграмма состояний — это граф всех возможных состояний кодера и возможных переходов из одного состояния в другое. Итоговая диаграмма состояний для этого кодера показана на рисунке 2.7.

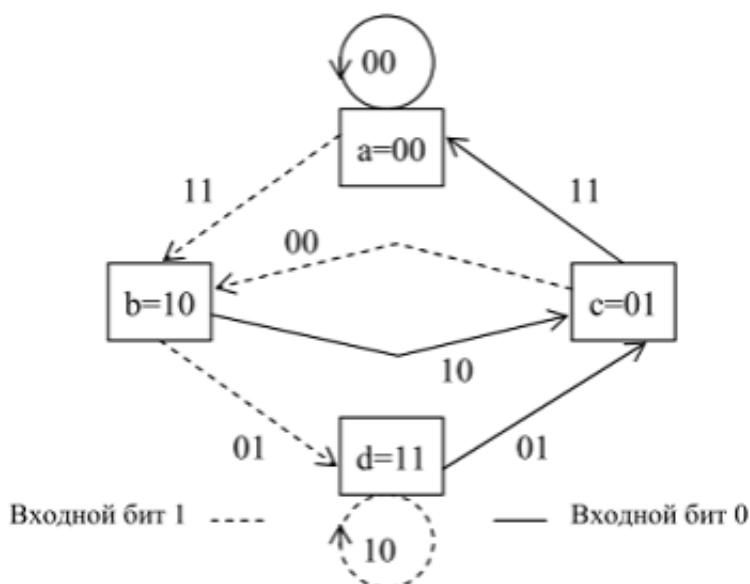


Рисунок 2.7 – Диаграмма состояний для свёрточного кода, имеющего параметры  $K=3$ ,  $R=1/2$

Декодирование сверточного кода в основном осуществляется алгоритмом Витерби. Данный алгоритм принимает решение по суммарным метрикам путей, причём в узлах, где эти пути сходятся. На рисунке 2.8 можно увидеть метрики в процессе декодирования, метрики обозначены данным образом для наглядности.

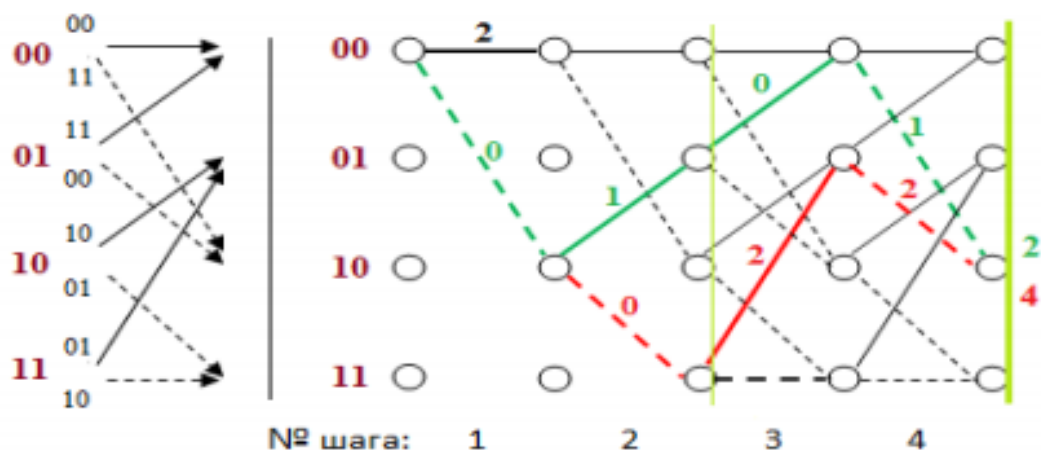


Рисунок 2.7 – Решетчатая диаграмма декодера Витерби

Алгоритм заключается в повторении одного основного шага. Метрика пути (МП) является суммой метрик ветвей, которые образуют некоторый путь на решетчатой диаграмме. Путь конечной длины заканчивается в определенном состоянии. Метрика состояния (МС) равна метрике пути, который заканчивается в данном состоянии. Шаг декодирования состоит в обработке декодером принимаемых из канала данных в интервале между двумя соседними отсчетами.

### 2.3 Турбокоды

Турбо-код – параллельный каскадный блочный систематический код, способный исправлять ошибки, возникающие при передаче цифровой информации по каналу связи с шумами. Синонимом турбо-кода является известный в теории кодирования термин — каскадный код (англ. concatenated code) (предложен Д. Форни в 1966 году). Турбо-код состоит из каскада параллельно соединенных систематических кодов. Эти составляющие называются компонентными кодами. В качестве компонентных кодов могут использоваться сверточные коды, коды Хемминга, Рида — Соломона, Боуза — Чоудхури — Хоквингема и другие. В зависимости от выбора компонентного кода турбо-коды делятся на сверточные турбо-коды (англ. Turbo Convolutional Codes, ТСС) и блочные коды произведения (англ. Turbo Product Codes, ТРС). Турбо-коды были разработаны в 1993 году и являются классом высокоэффективных помехоустойчивых кодов с коррекцией ошибок, используются в электротехнике и цифровой связи.

До момента возникновения турбо-кода был широко распространен метод каскадного кодирования, при котором данные кодировались сначала кодом Рида — Соломона, а затем сверточным кодом [5].

Согласно Шеннону, наилучшим кодом является код, который передает сообщение за бесконечно большое время, формируя в каждый момент времени

случайные кодовые элементы. У приемника есть бесконечные версии сообщения, искаженного случайным образом. Из этих копий декодер должен выбрать копию, наиболее близкую к переданному сообщению. Это представляет собой теоретически идеальный код, который может исправить все ошибки в сигнале. Турбо-код является шагом в этом направлении. Ясно, что мы не должны посылать информационное сообщение в течение бесконечного времени. Для приемлемой работы достаточно удвоить или утроить время передачи, что обеспечит довольно приличные результаты для каналов связи.

Особенностью турбо-кодов является параллельная структура, состоящая из систематических сверточных кодов, работающих параллельно и использующих создание случайной версии сообщения. Параллельная структура использует два или больше сверточных кодов, каждый с различным перемежителем. Цель перемежителя состоит в том, чтобы предложить каждому кодеру некоррелированную или случайную версию информации, в результате чего паритетные биты каждого кода становятся независимыми.

В турбо-кодах блоки имеют длину порядка нескольких  $K$  бит. Цель такой длины состоит в том, чтобы эффективно рандомизировать последовательность, идущую на второе кодирующее устройство.

Существует несколько схем турбо-кодов:

- PCCC – в случае соединения параллельных сверточных кодов;
- SCCC – схема с последовательным соединением сверточных кодов, коды SCCC имеют высокие характеристики при больших отношениях сигнал/шум;
- TPC – турбо-код-произведение, использует блочные коды вместо сверточных.

Два различных блочных кода соединены последовательно без промежуточного перемежителя. Так как два кода независимы и работают в рядах и колонках, что само по себе обеспечивает достаточно хорошую рандомизацию, то применение перемежителя не требуется. На рисунке 2.8 представлена структурная схема турбо-кодера.

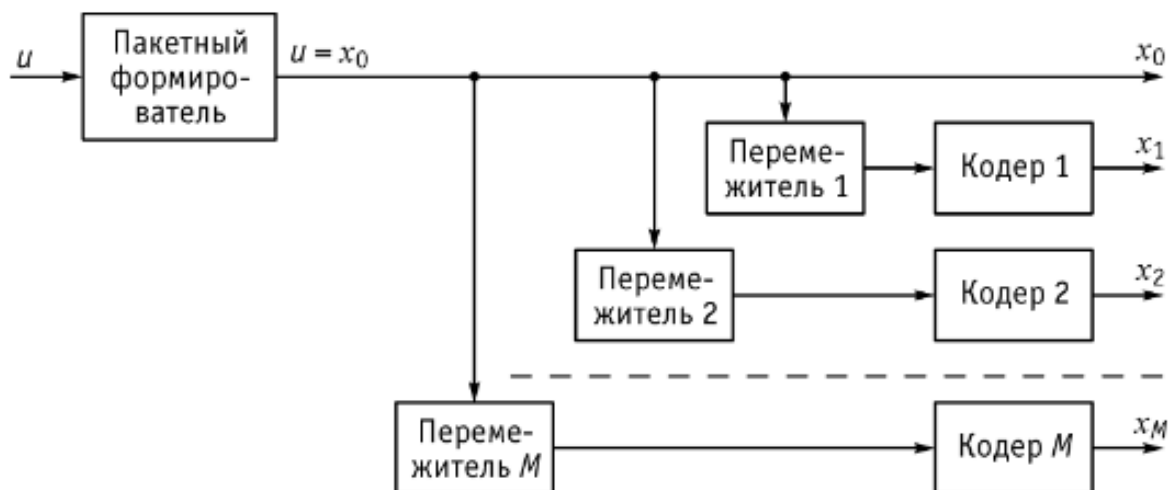


Рисунок 2.8 – Общая структурная схема турбо-кодера

Вначале на вход формирователя пакетов PAD (англ. Packet Assembler/Disassembler) поступает блок данных  $U$  длиной  $k$  бит. В формирователе пакетов к информационным символам еще прибавляются дополнительные биты служебной информации, соответствующих используемому стандарту формирования пакета и которые включают в себя символы его начала и окончания. То есть получается пакет  $X_0$ , состоящий из  $n$  бит.

Далее последовательность бит  $X_0$  поступает параллельно на  $M$  ветвей, которые содержат последовательно соединенные перемежитель и компонентный кодер.

Таким образом,  $X_0$  используется в качестве входных данных сразу всеми компонентными кодерами.

## **2.4 Сравнительный анализ эффективности современных помехоустойчивых кодов**

Рассмотренные выше теоретические материалы требуют их практического подтверждения. Для наглядного подтверждения соответствия эмпирических результатов теоретическим, было выбрано три метода помехоустойчивого кодирования: сверточное кодирование, коды Рида-Соломона и турбокодирование. Были выбраны и составлены оптимальные модели в MATLAB, произведено моделирование.

MATLAB - это высокопроизводительный инструмент для выполнения технических расчетов.

Для удобства работы в состав MATLAB входит программа Simulink, которая позволяет выполнять моделирование систем в графическом виде. Simulink содержит библиотеку элементов (blocksets) для построения систем из отдельных блоков и позволяет соединять эти блоки друг с другом с помощью мыши.

Необходимо построить соответствующие схемы, которые будут в себя включать источник сообщения, кодер, декодер, канал передачи, анализатор ошибок и соответственно устройства визуализации полученных результатов.



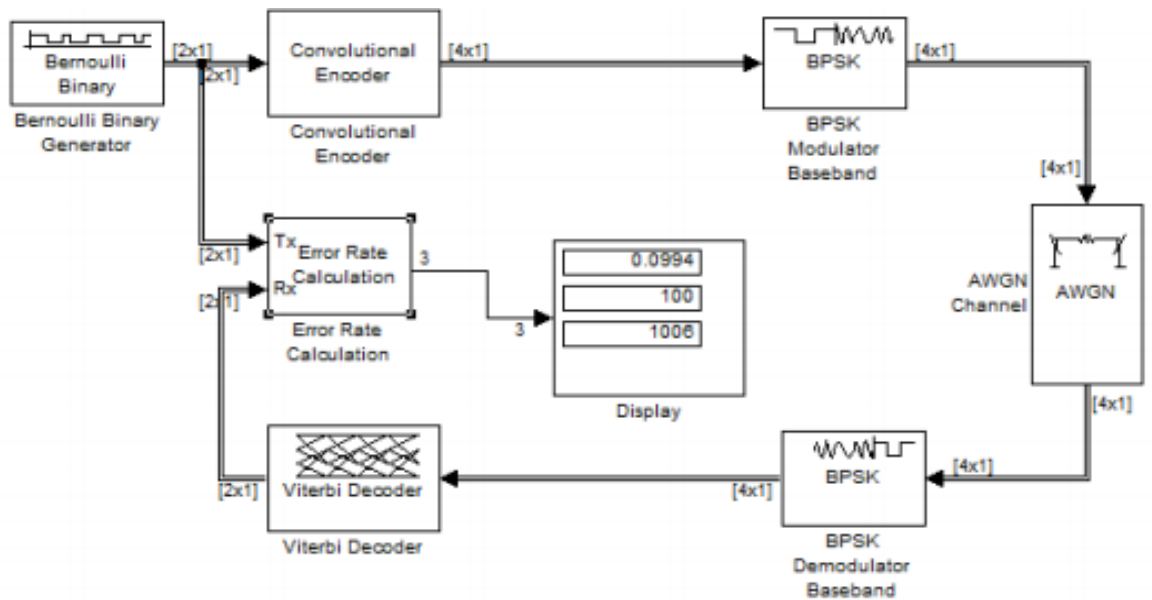


Рисунок 2.9 – Канал связи со сверточным кодированием сигнала

В рабочем поле собирается канал связи со сверточным кодированием сигнала (рисунок 2.9).

В качестве входного сигнала применяется случайная последовательность двоичных чисел Бернулли, которая задается в блоке Bernoulli Binary Generator, в настройках блока указывается частота дискретизации и вероятности появления нулей и единиц. Далее сигнал поступает в сверточный кодер, затем происходит модуляция сигнала, следующий блок моделирует канал связи с помехами, которых характеризуется отношением сигнал/помеха в дБ. После сигнал поступает в демодулятор и декодер по алгоритму Витерби. Исходный и декодированный сигнал поступает в блок вычисления ошибки, где формируется таблица с зависимостью вероятности ошибочного приема от величины отношения сигнал/помеха.

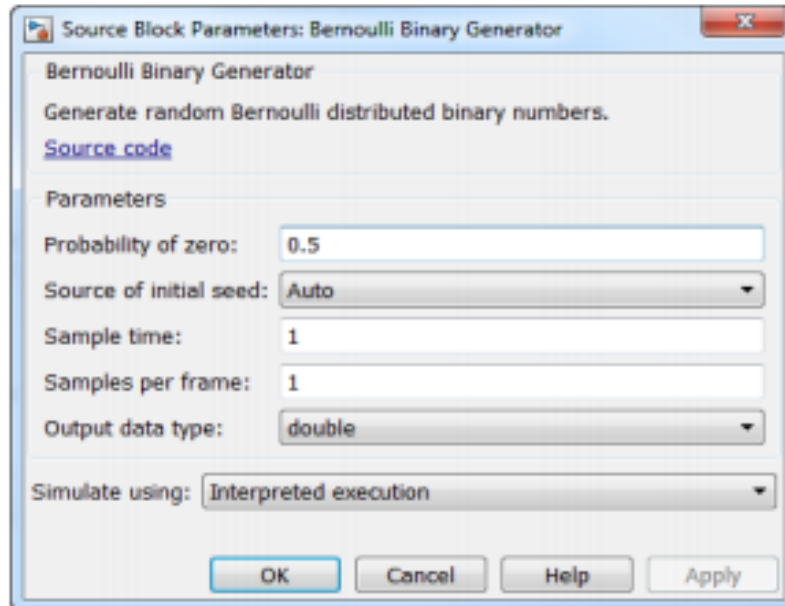


Рисунок 2.10 – Диалоговое окно блока Bernoulli Binary Generator

Параметры блока Bernoulli Binary Generator:

Вероятность нуля (probability of zero). Указывается вероятность того, с помощью которого происходит нулевой выход. Указывается вероятность в качестве вектора скалярного или строки, элементы которой являются действительными числами от 0 до 1. Количество элементов в вероятности параметра нулевого соответствует числу независимых выходных каналов из блока.

Первоначальный источник (source of initial seed) – это источник исходных данных для генератора случайных чисел. Указывается либо Auto или Parameter. Если установлено значение Auto, блок использует глобальный поток случайных чисел. Источник исходных данных для генератора случайных чисел. Указываются в источнике неотрицательные целые числа. Первоначальный источник доступен, когда установлено значение Parameter.

Время образца (sample time) – это время между каждым образцом колонки выходного сигнала.

Образцы в кадре (samples per frame). Число выборок на кадр в одном канале выходного сигнала. Указываются выборки в кадре в качестве натурального скалярного произведения.

Тип вывода данных (output data type) – тип выходного блока может быть определено как boolean, uint8, uint16, uint32, single или double.

Double – это одиночные выходы, которые могут привести к различным результатам по сравнению с двойными выходами для того же набора параметров.

Моделировать с помощью (simulate using), в этом блоке нужно выбрать режим моделирования: Code generation – на первой модели запуска, моделирования и генерации кода. Если структура блока не изменяется, последующих запусках модели не регенерируют кода. Interpreted execution –

с моделировать модель без генерации кода. Эта опция приводит к более быстрому запуску, но может замедлить производительность последующего моделирования.

Tail-Biting Convolutional Encoder кодирования гарантирует, что исходное состояние датчика является таким же, как конечное состояние (и что это значение состояния не обязательно должно быть из всех нулей).

BPSK Modulator Baseband (двоичная фазовая модуляция) – данный блок модулирует с использованием метода двоичной фазовой манипуляции. Выходной сигнал представляет собой групповое представление модулированного сигнала.

AWGN Channel (канал с аддитивным белым гауссовым шумом), в этом блоке канал добавляет шум в сигнал, который проходит через него.

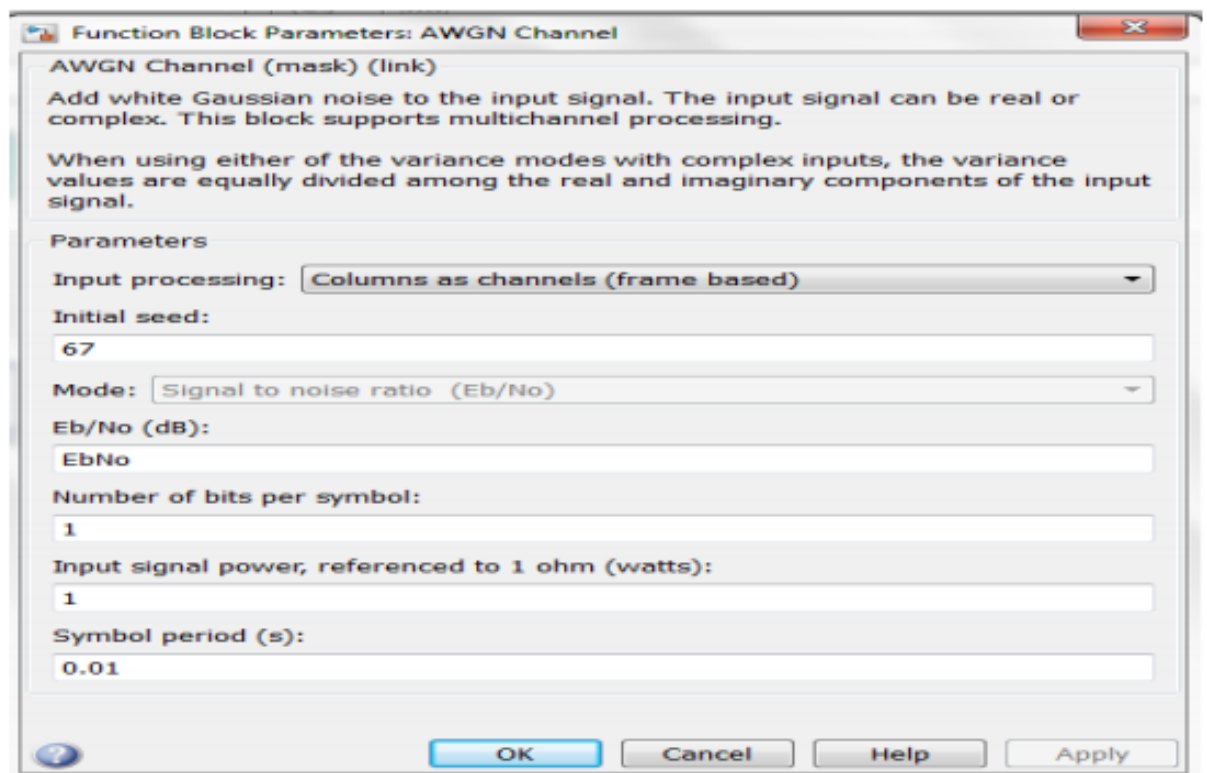


Рисунок 2.11 – Диалоговое окно блока AWGN Channel

BPSK демодулятор Блок BPSK демодулятор демодулирует сигнал, модулированный с помощью двоичной фазовой манипуляции метода сдвига. Входными данными является представление полосы модулированного сигнала.

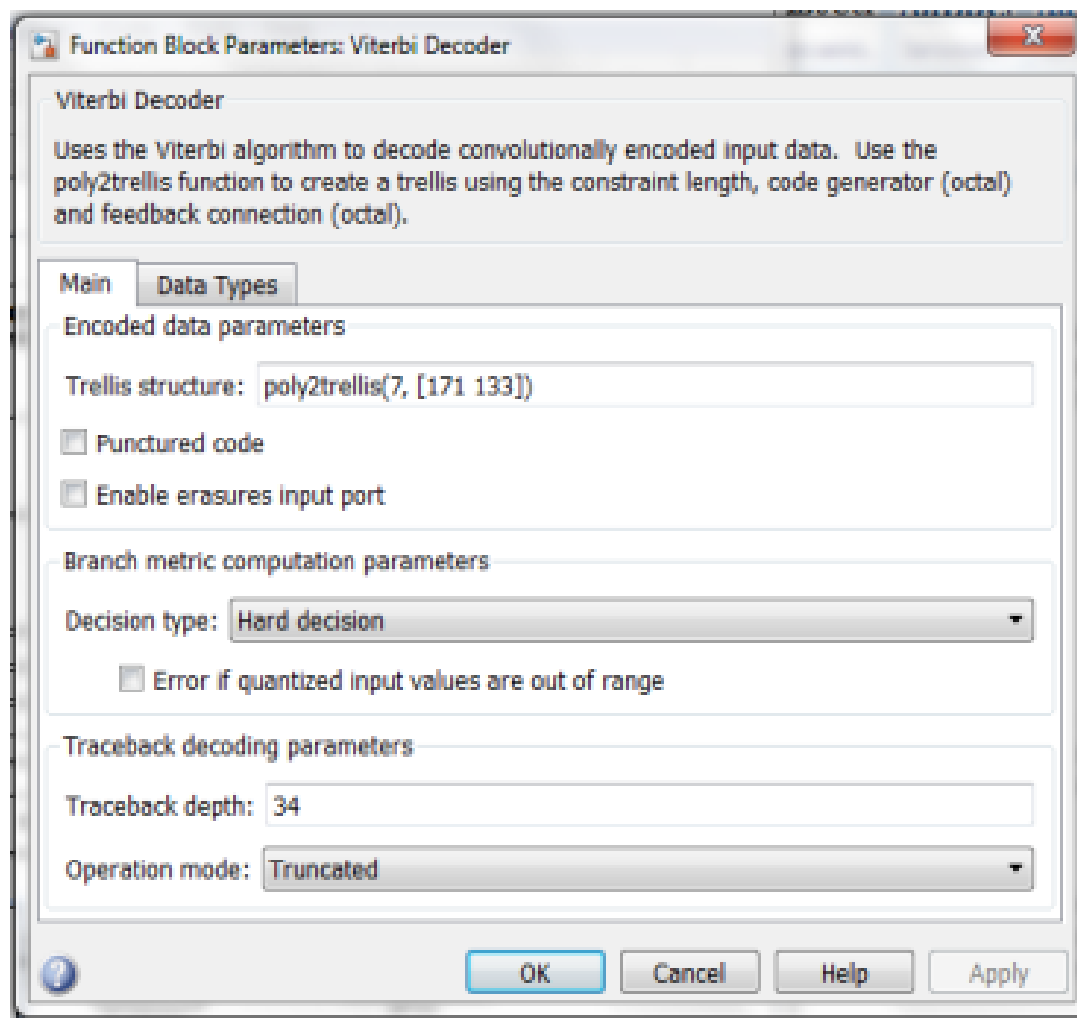


Рисунок 2.11 – Диалоговое окно блока декодера Витерби

Блок декодера Витерби декодирует входные символы для получения двоичных выходных символов. Этот блок может обрабатывать несколько символов одновременно для повышения производительности. Используют алгоритм Витерби для декодирования сверточного кодирования входных данных. Используют функцию `poly2trellis` для создания решетчатой структуры, используя ограничение длины генератора кода (восьмеричное) и обратной связи (восьмеричное).

На рисунке 2.12 представлено диалоговое окно калькулятора ошибок `Error Rate calculation`

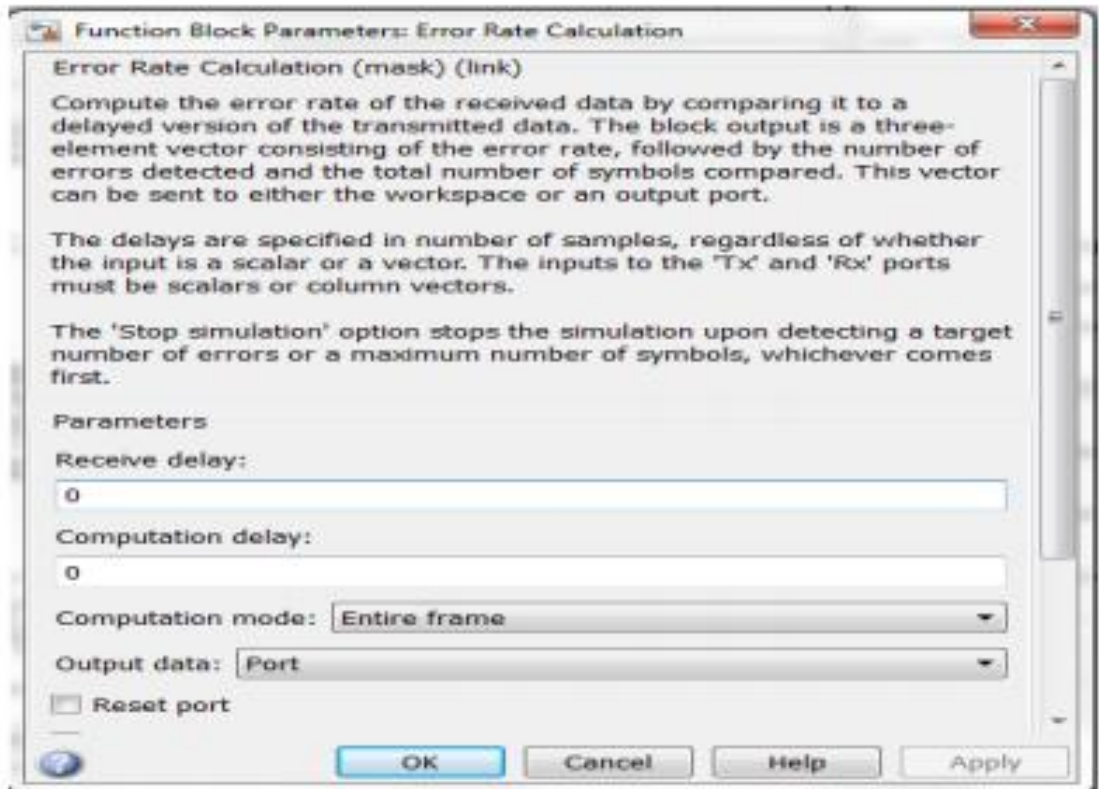


Рисунок 2.12 – Диалоговое окно калькулятора ошибок Error Rate calculation

Вычисляется коэффициент погрешности полученных данных и сравнивается его с задержкой передаваемых данных. Выходной блок состоит из трех элементов вектора  $a$ , который состоит из частоты ошибок, за которым следует количество обнаруженных ошибок и общее число символов. Этот вектор может быть направлен либо в рабочую область или в порт вывода.

Следующим кодом, который мы построим в программе это турбо-код. На рисунке 2.13 представлен канал связи с турбо-кодированием сигнала.

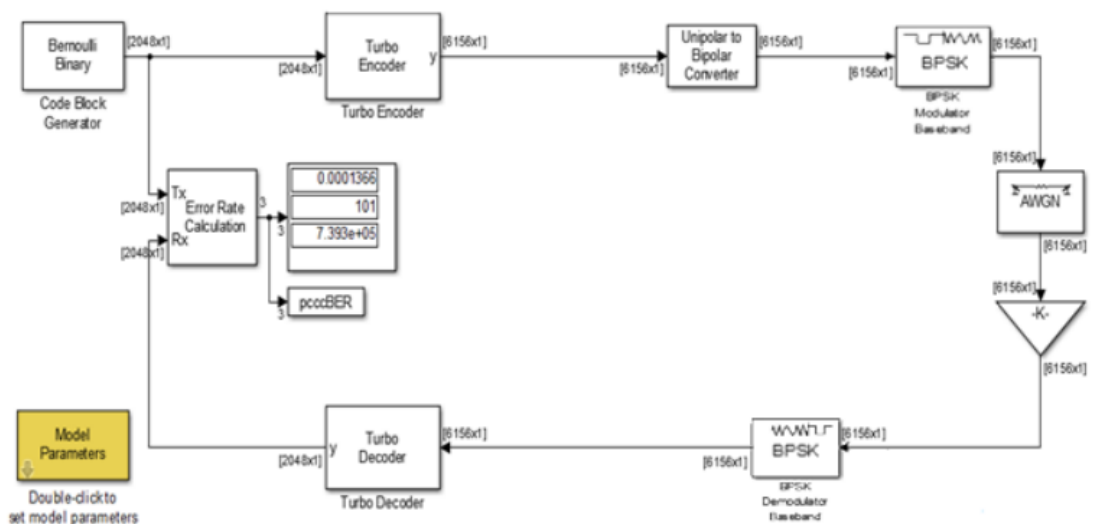


Рисунок 2.13 – Канал связи с турбо-кодированием сигнала

В качестве входного сигнала используется случайная последовательность двоичных чисел Бернулли, которая задается в блоке Bernoulli Binary Generator, в настройках блока указывается частота дискретизации и вероятности появления нулей и единиц. Далее сигнал поступает в турбо-кодер, затем сигнал поступает в блок однополярного к биполярного преобразователю, преобразует однополярный входной сигнал к биполярным выходным сигналом. Далее происходит модуляция сигнала BPSK, следующий блок моделирует канал связи с помехами, которых характеризуется отношением сигнал/помеха в дБ. После сигнал поступает в демодулятор и декодер. Исходный и декодированный сигнал поступает в блок вычисления ошибки, где формируется таблица с зависимостью вероятности ошибочного приема от величины отношения сигнал/помеха.

Блок турбо-кодер кодирует двоичный входной сигнал с помощью параллельной схемы кодирования. Эта схема кодирования использует два идентичных сверточных кодеров и один внутренний перемежитель. Каждый составной кодер независимо завершается окончательным битом. На рисунке 2.14 представлено диалоговое окно блока Turbo encoder.

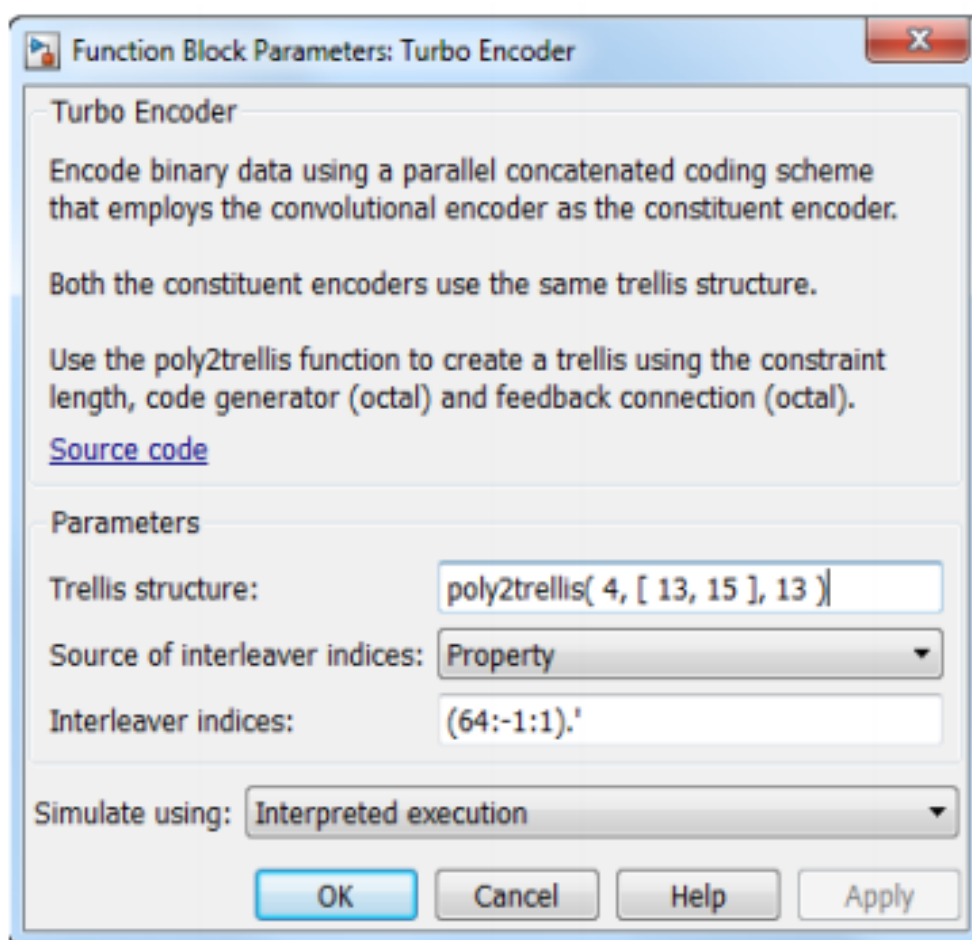


Рисунок 2.14 – Диалоговое окно блока Turbo encoder

Unipolar to Bipolar Converter – это блок однополярного к биполярного преобразователю, преобразует однополярный входной сигнал к биполярным выходным сигналом. На рисунке 2.15 представлено диалоговое окно блока Unipolar to Bipolar Converter.

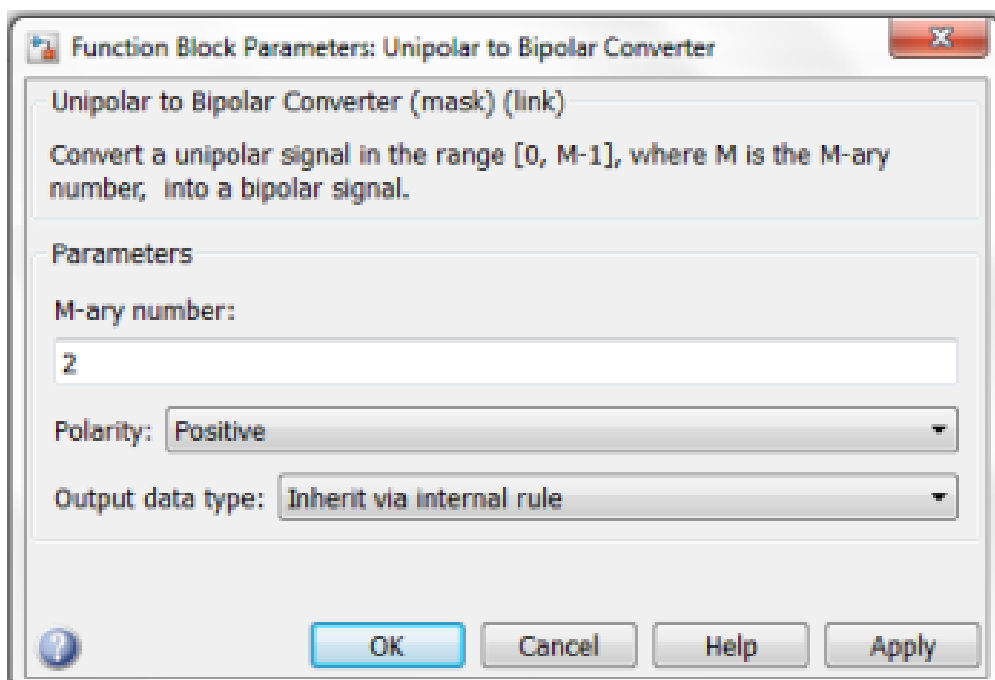


Рисунок 2.15 – Диалоговое окно блока Unipolar to Bipolar Converter

BPSK Modulator Baseband (двоичная фазовая модуляция) – этот блок модулирует с использованием метода двоичной фазовой манипуляции. Выходной сигнал представляет собой групповое представление модулированного сигнала.

AWGN Channel(канал с аддитивным белым гауссовым шумом) Канал добавляет белый гауссовский шум в сигнал, который проходит через него

BPSK демодулятор Блок BPSK демодулятор демодулирует сигнал, модулированный с помощью двоичной фазовой манипуляции метода сдвига.. Входными данными является представление полосы модулированного сигнала

На рисунке 2.16 представлено диалоговое окно блока турбо-декодера.

Блок турбо-декодер декодирует входной сигнал с помощью параллельной каскадной схемы декодирования.

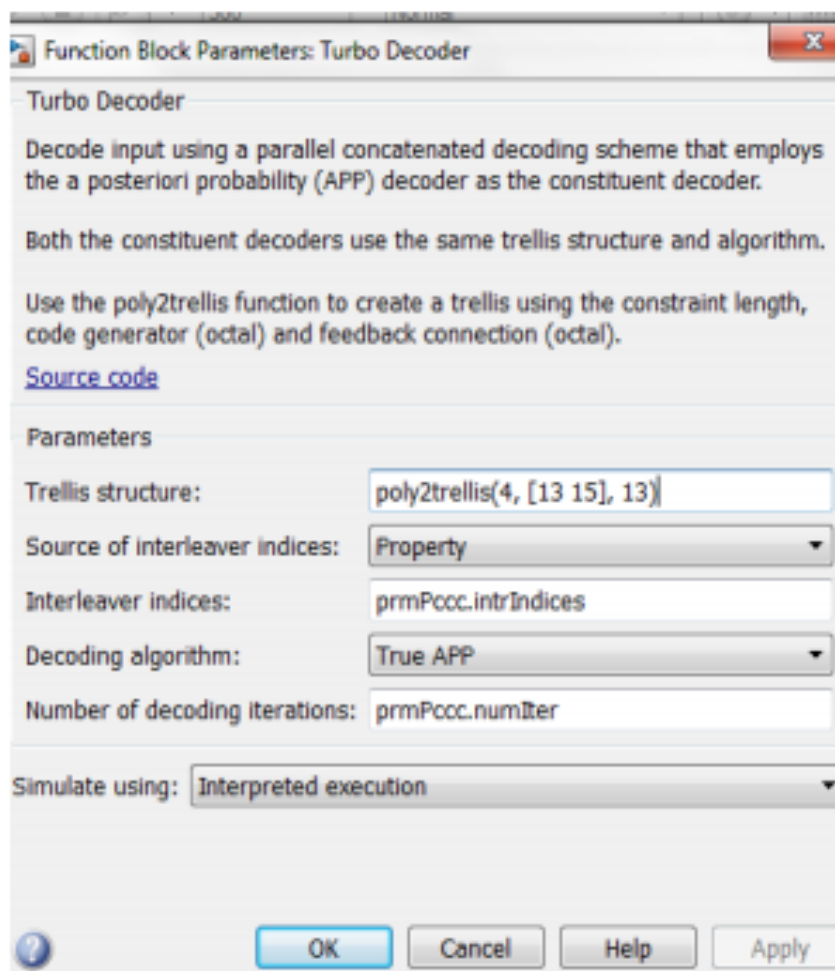


Рисунок 2.15 – Диалоговое окно блока турбо-декодера

Аналогичным образом собирается канал связи с кодированием кода Рида-Соломона.

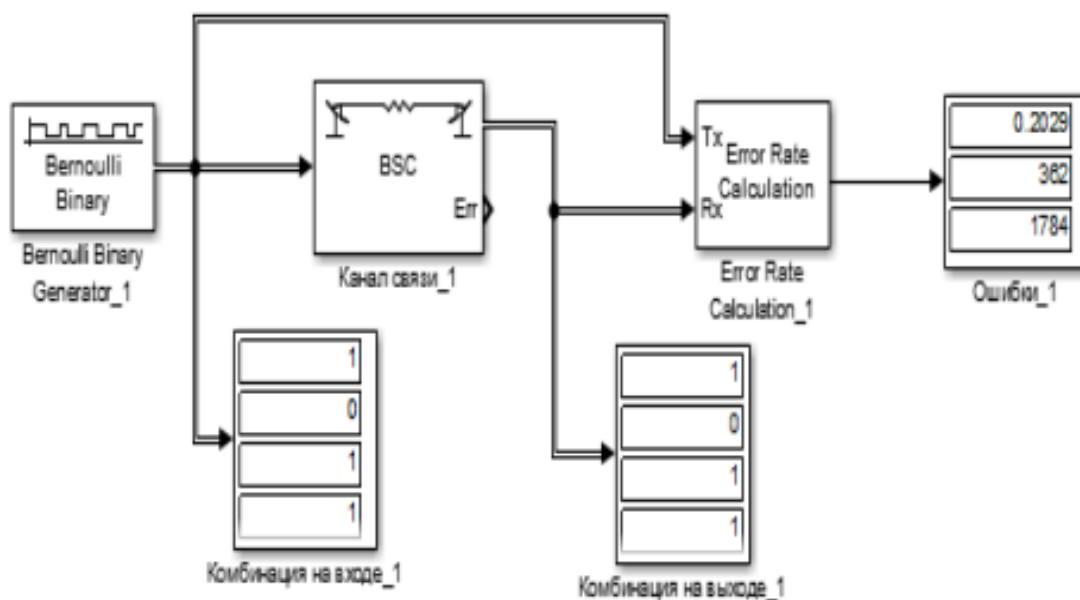


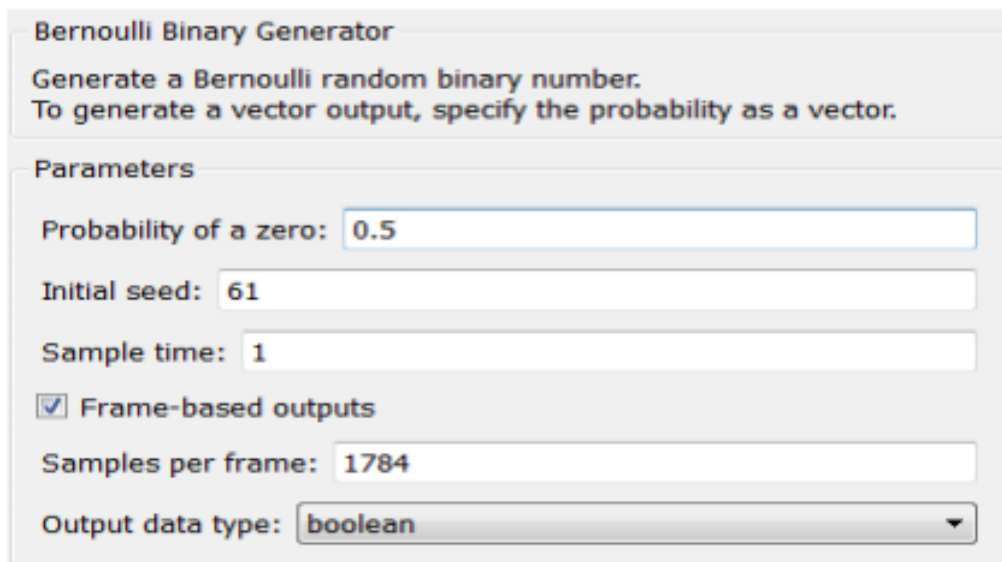
Рисунок 2.16 – Канал связи с кодированием Рида-Соломона



В состав линии без преобразований входят:

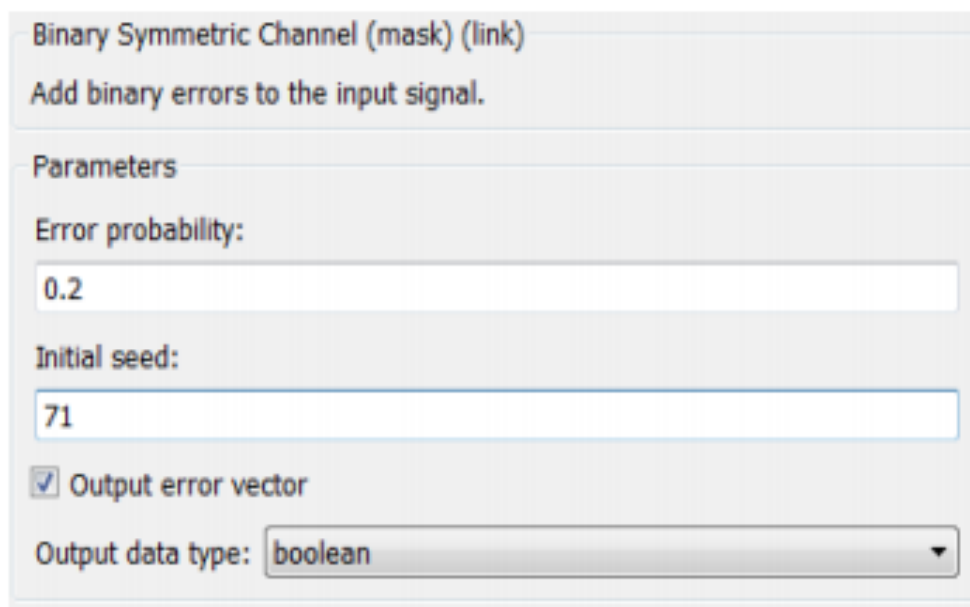
- 1 BernoulliBinaryGenerator
- 2 Binary Symmetric Channel (каналпередачи)
- 3 Error RateCalculation (анализаторошибок)
- 4 Display

Характеристики блоков выставить следующие:



The screenshot shows the configuration window for the 'Bernoulli Binary Generator' block. The title bar reads 'Bernoulli Binary Generator'. Below the title, there is a description: 'Generate a Bernoulli random binary number. To generate a vector output, specify the probability as a vector.' The 'Parameters' section includes several input fields and a checkbox: 'Probability of a zero:' with a value of 0.5; 'Initial seed:' with a value of 61; 'Sample time:' with a value of 1; a checked checkbox for 'Frame-based outputs'; 'Samples per frame:' with a value of 1784; and 'Output data type:' set to 'boolean' in a dropdown menu.

Рисунок 2.17 – Bernoulli Binary Generator



The screenshot shows the configuration window for the 'Binary Symmetric Channel (mask) (link)' block. The title bar reads 'Binary Symmetric Channel (mask) (link)'. Below the title, there is a description: 'Add binary errors to the input signal.' The 'Parameters' section includes several input fields and a checkbox: 'Error probability:' with a value of 0.2; 'Initial seed:' with a value of 71; a checked checkbox for 'Output error vector'; and 'Output data type:' set to 'boolean' in a dropdown menu.

Рисунок 2.18 – Binary Symmetric Channel

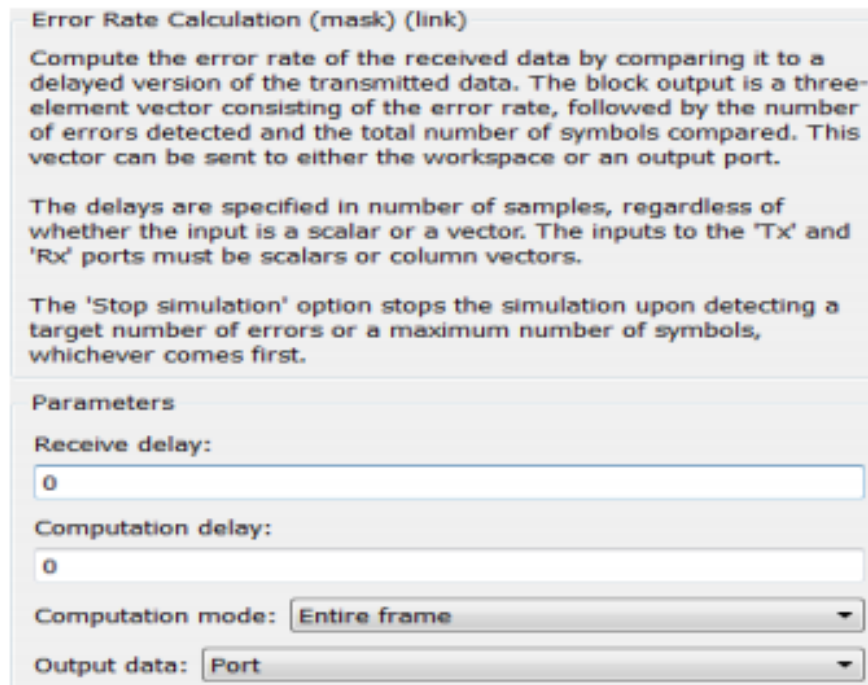
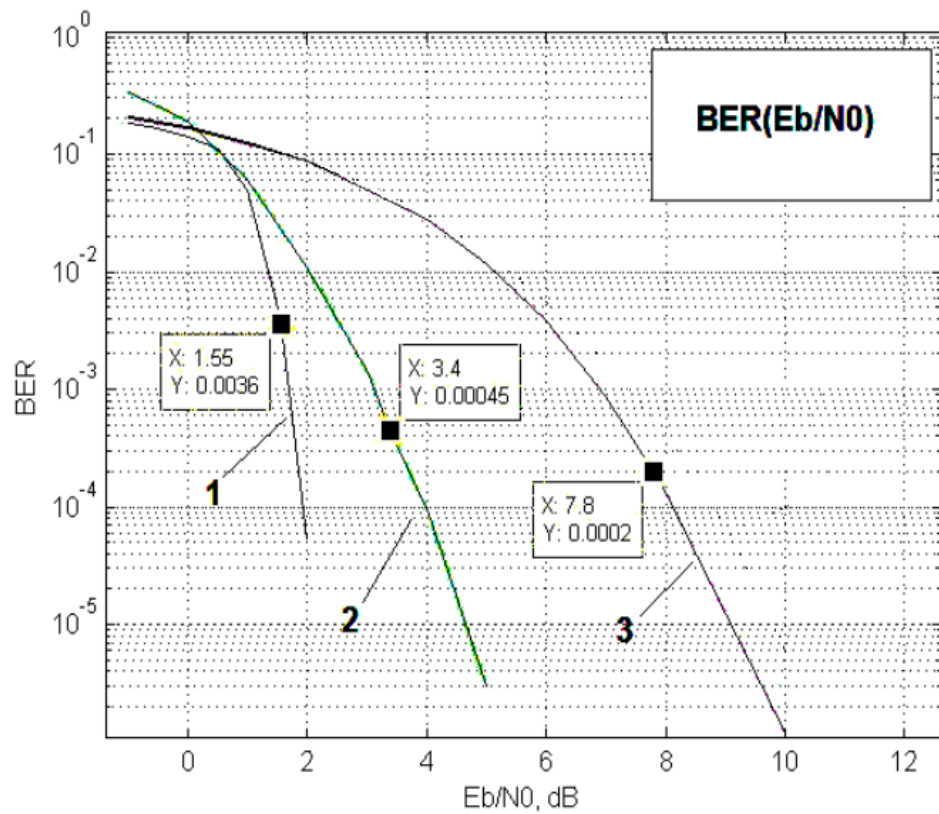


Рисунок 2.19 – ErrorRateCalculation (анализатор ошибок)

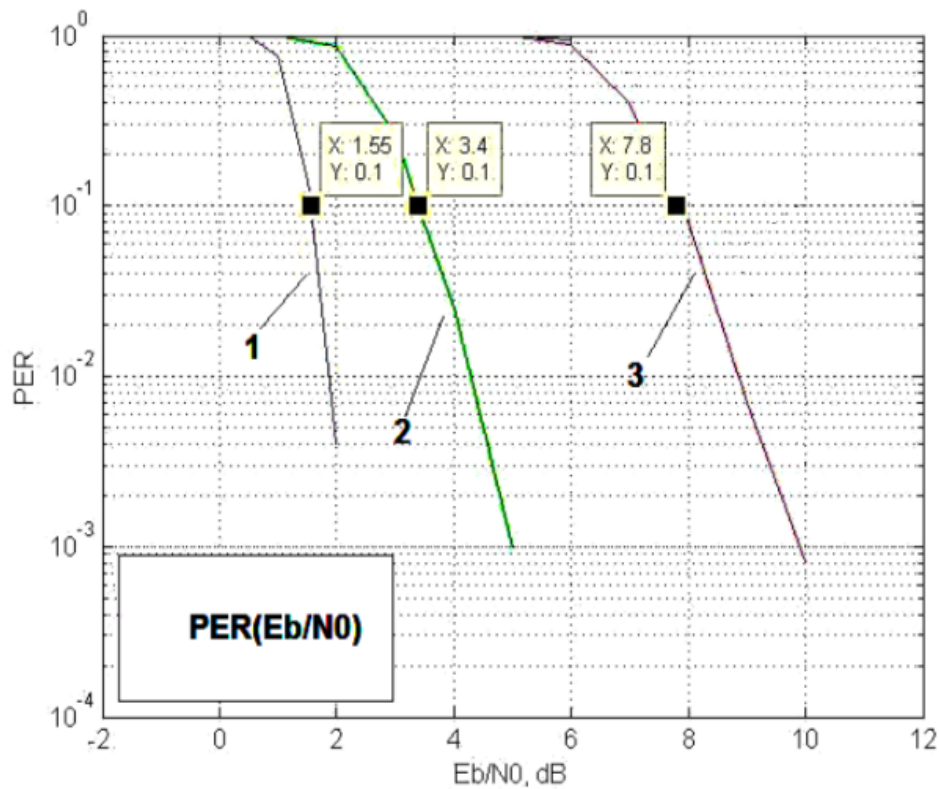
Основная характеристика, которая описывает эффективность кода — BER в зависимости от  $E_b/N_0$ . На рисунке 2.20 видно, что наименьшее отношение  $E_b/N_0$  на всем исследуемом интервале у турбо-кода, после него — сверточный код. И значительно хуже работает коды Рида – Соломона.

Поскольку описываемые коды используются для пакетной передачи данных, рассмотрим другую характеристику, которая более точно описывает реальную применимость кода – PER от  $E_b/N_0$  (рисунок 2.21).

Эта зависимость получена при условии, что необходима передача без ошибок, т.е. пакет стирается, если произошло ошибочное восстановление. В этом случае задавалось критическое значение приемлемой вероятности пакетной ошибки, равное 0,1. Это означает, что если 9 из 10 пакетов будут переданы без ошибок, то кодирование удовлетворяет требованиям качества связи. Из рисунка 2.21 следует, что турбо-код может использоваться для работы с ограничениями начиная от отношения битовой энергии к спектральной плотности шума в 1,55 дБ, сверточный код от 3,4 дБ, а код Рида – Соломона от 7,8 дБ.



1 — турбо-код; 2 — свёрточный код; 3 — код Рида – Соломона  
 Рисунок 2.20 – BER в зависимости от  $E_b/N_0$  для различных кодов



1 — турбо-код; 2 — свёрточный код; 3 — код Рида – Соломона  
 Рисунок 2.21 – PER в зависимости от  $E_b/N_0$  для различных кодов

Выводы по второй главе.

Сравнивая характеристики трех исследованных кодов: сверточного, Рида-Соломона и турбо-кодов, можно прийти к однозначному преимуществу в помехоустойчивости турбо-кода. Даже в условиях зашумленного канала, с помехами, практически соизмеримыми с сигналом, возможно практически безошибочное ведение сеанса радиоуправления. Рассмотрим преимущества турбо-кодов:

- среди всех используемых современных методов коррекции ошибок турбокоды и коды с низкой плотностью проверок на четность наиболее близко подходят к границе Шеннона, теоретическому пределу максимальной пропускной способности канала;

- турбо-коды позволяют увеличить скорость передачи информации, не требуя увеличения мощности передатчика, или они могут быть использованы для уменьшения требуемой мощности при передаче с заданной скоростью;

- важным преимуществом турбо-кодов является независимость сложности декодирования от длины информационного блока, что позволяет снизить вероятность ошибки декодирования путем увеличения его длины;

Однако при всех преимуществах данного вида кодирования у него есть свои недостатки.

Недостатки:

- относительно высокая сложность декодирования и большая задержка, которые делают их неудобными для применений;

- небольшое кодовое расстояние (то есть минимальное расстояние между двумя кодовыми словами в смысле выбранной метрики). Это приводит к тому, что, хотя при большой входной вероятности ошибки (в плохом канале) эффективность турбо-кода высока. Хотя сложность используемых алгоритмов турбо-кодирования и недостаток открытого программного обеспечения препятствуют внедрению турбо-кодов, в настоящее время многие современные системы используют турбо-коды.

### 3 Модель реализации турбо-кода

Турбо-код – очень мощная техника исправления ошибок, которая выигрывает у всех известных предыдущих схем кодирования. Он может использоваться в любой системе связи, где существенна экономия энергии или отношение сигнал/шум очень низко [5].

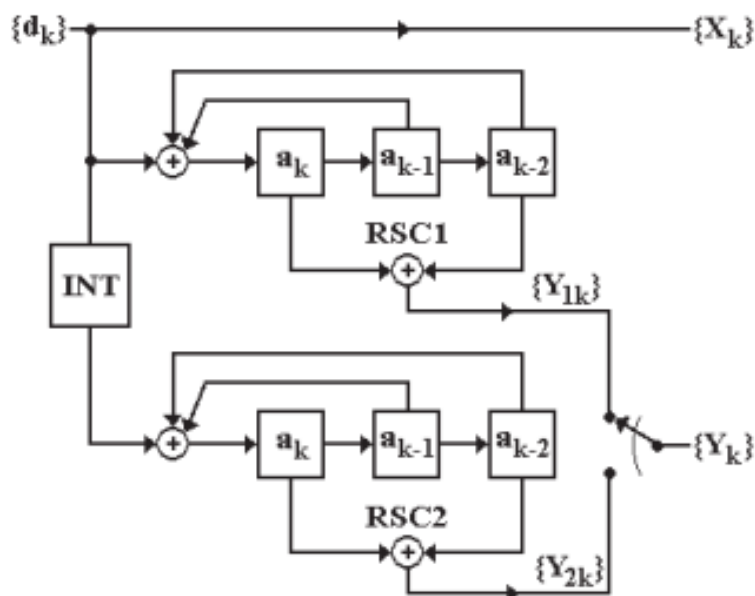


Рисунок 3.1 – Кодер турбокода с использованием RCS

На рисунке показан кодер турбокода с использованием RCS. RCS это сверточное кодирование. Каждый RCS имеет длину кодового ограничения  $K=3$  и используется с двумя генераторами кода  $G_1=\{1,1,1\}$  и  $G_2=\{1,0,1\}$ .

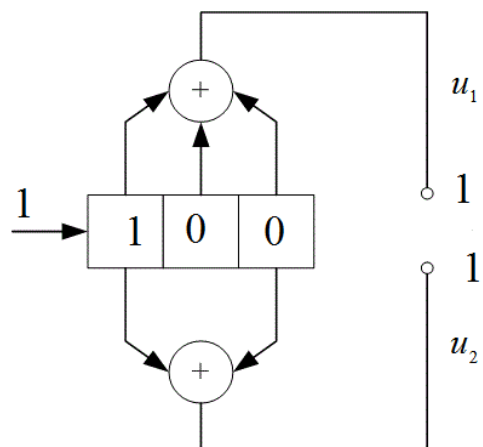
Так как кодер турбокода состоит из параллельно расположенных кодеров сверточного кода, кодирование турбокода осуществляется аналогично сверточному коду. Далее закодированный сигнал поступает в перемежитель. В перемежителях по псевдослучайному закону происходит перемешивание поступающих бит.

$$m=101, K=3, G_1=\{1,1,1\}, G_2=\{1,0,1\}, R=1/2.$$

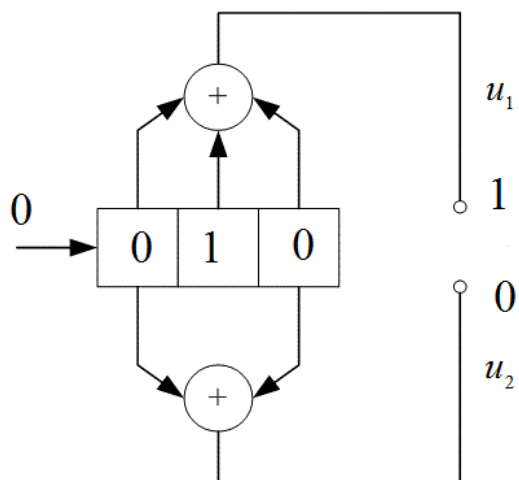
Скорость  $R=1/2$  означает что, кодер имеет один вход и два выхода.

В зависимости от значения генераторов, значения блоков складываются по модулю 2.

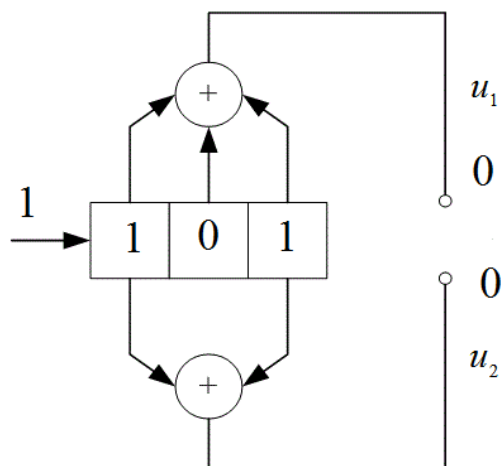
В первый такт времени  $t_1$ :



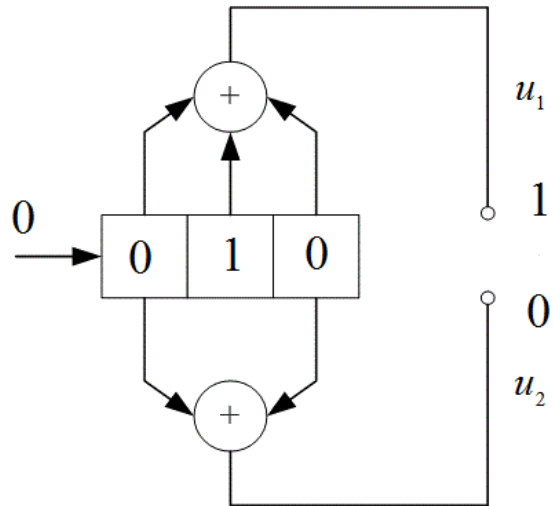
Во второй такт времени  $t_2$ :



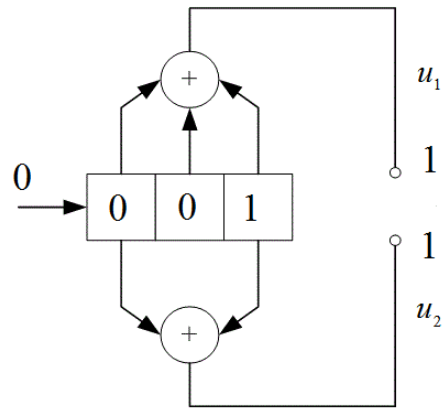
В третий такт времени  $t_3$ :



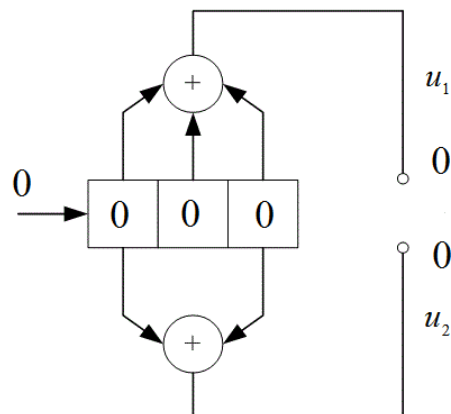
В четвертый такт времени  $t_4$ :



В пятый такт времени  $t_5$ :



В шестой такт времени  $t_6$ :



Выходное значение:  $U_1=111000101100$

Также для проверки закодируем методом многочлена:

$$m=101=x^2+1;$$

$$g_1=111=x^2+x+1;$$

$$g_2=101=x^2+1.$$

$$m(x) \cdot g(x), \quad (3.1)$$

где  $m(x)$  – входные значения;

$g(x)$  – значения генератора.

Подставляем:

$$(x^2+1)(x^2+x+1) = x^4+x^3+x^2+x^2+x+1=x^4+x^3+x+1,$$

$$(x^2+1)(x^2+1) = x^4+x^2+x^2+1=x^4+1,$$

$$m(x)g_1(x) = 1x^4+1x^3+0x^2+1x+1,$$

$$m(x)g_2(x) = 1x^4+0x^3+0x^2+0x+1,$$

$$U_2=111000101100,$$

$$U_1=U_2.$$

Следую вычислениям можно увидеть, что закодированный методом многочлена сигнал, совпадает с первоначально закодированным сигналом. Далее закодированный сигнал поступает в перемежитель. В перемежителях по псевдослучайному закону происходит перемешивание поступающих бит.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе был проведен сравнительный анализ помехоустойчивого кодирования с использованием кодов Рида-Соломона, сверточных и турбо-кодов. Также в дипломной работе была изучена и проанализирована литература по данной теме, показаны модели помехоустойчивого кодирования.

На основании проведенного сравнительного анализа современных помехоустойчивых кодов, были сделаны выводы об эффективности кодов.

Для оценки эффективности различных кодов были получены зависимости:

- вероятность битовой ошибки (BER — BitErrorRate) от отношения энергии одного бита к спектральной плотности мощности шума ( $E_b/N_0$ );
- вероятность пакетной ошибки (PER — PacketErrorRate) от  $E_b/N_0$ .

В результате анализа был выбран наиболее эффективный код.

Наиболее помехозащищенный из исследованных кодов – турбо-код. Даже в условиях зашумленного канала, с помехами, практически соизмеримыми с сигналом.

Важным преимуществом турбо-кодов является независимость сложности декодирования от длины информационного блока, что позволяет снизить вероятность ошибки декодирования путем увеличения его длины.

Недостатком является относительно высокая сложность декодирования и большая задержка, которые делают их неудобными для применений;

В настоящее время многие современные системы используют турбо-коды.

Используя кодирование сигнала, канал становится менее уязвимым для воздействия помех и перехвата.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Цифровая связь. Бернард Скляр. Теоретические основы и практическое применение. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 1104 с.
- 2 Введение в теорию помехоустойчивого кодирования. Давыдов А.В., Мальцев А.А. - Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2014. – 123 с.
- 3 Телемеханика. Н. Тутевич. Учебное пособие для вузов. –М.: Высшая школа, 1985. – 423с.
- 4 Помехоустойчивость и эффективность систем передачи информации. А.Г. Зюко, А.И. Фалько, Л.В. Банкет. – М.: Радио и связь, 1985. – 272 с.
- 5 Модуляция, кодирование и моделирование в телекоммуникационных системах. Теория и практика: учебное пособие. - А.М.Голиков. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2016. – 516 с.
- 6 Воробьев К.А., Аджанов С.С. Сравнение и анализ характеристик блочных и сверточных турбокодов. Технологии информационного общества. Статья по специальности «Компьютерные и Информационные науки». Т-Comm, #11-2011 С. 17-19