ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 004.1996

Имитационная модель помехоустойчивого канала связи

Т.А. Исакова
Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Аннотация
Рассматривается проблема повышения надежности передачи информации в условиях наличия помех в каналах связи. Целью работы является построение имитационной модели помехоустойчивого канала связи. Предложена имитационная модель помехоустойчивого канала связи, которая включает механизмы восстановления данных. Приведены основные математические модели каналов связи: двоичный симметричный канал и источники помех. Описан процесс моделирования канала связи, а также проведен анализ эффективности различных кодеков в зависимости от параметра источника ошибок. Данная статья подчеркивает новизну подхода к адаптивному выбору кодеков для повышения помехоустойчивости и применимости модели в реальных условиях.

Ключевые слова: помехоустойчивое кодирование, имитационная модель, канал связи, код Хэмминга, код Рида-Маллера, двоичный симметричный канал, корреляция ошибок, источники помех, цифровая связь, аддитивный шум

Для цитирования. Исакова Т.А. Имитационная модель помехоустойчивого канала связи. *Молодой исследователь Дона.* 2025;10(2):5–10.

Simulation Model of a Communication Channel with Immunity to Interference

Tatyana A. Isakova
Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Abstract
The article investigates the problem of improving reliability of data transmission in conditions of interference presence in communication channels. The research objective is to create a simulation model of a communication channel with immunity to interference. A simulation model of such a channel, which includes the data recovery mechanisms, has been proposed. The main mathematical models of communication channels have been provided: binary symmetric channel and interference sources. The process of modeling a communication channel has been described, and efficiency of various codecs depending on the error source parameter has been analysed. The article highlights the novelty of adaptive selection of codecs, which contributes to improving the interference immunity and applicability of the model in real conditions.

Keywords: error control coding, simulation model, communication channel, Hamming code, Reed-Muller code, binary symmetric channel, error correlation, interference sources, digital communication, additive noise

For Citation. Isakova TA. Simulation Model of a Communication Channel with Immunity to Interference. *Young Researcher of Don*. 2025;10(2):5–10.

Введение. В век компьютерных технологий информация представляет собой ценнейший ресурс. Её особенностью как ресурса является, в частности, то, что в некоторых ситуациях при потере даже небольшой части передаваемой информации вся остальная её часть может оказаться бесполезной. При этом существует множество факторов, которые могут помешать корректной передаче информации по различным каналам связи. Например, при передаче данных в виде радиосигнала помехи могут быть вызваны атмосферными явлениями, а при передаче электронных сигналов по проводам — воздействием высокочастотных помех от внешних источников.

В связи с этим встает вопрос о создании механизмов защиты от помех, а также разработки способов восстановить информацию, если помехи всё же попали в канал связи. Однако даже при использовании самых совершенных методов защиты не может быть стопроцентной гарантии, что помехи все же не появятся и не исказят информацию. Поэтому в любом канале связи актуальна реализация алгоритмов и методов восстановления

© Исакова Т.А., 2025

исходной информации при попадании в неё ошибок в процессе передачи. Разнообразные механизмы такого рода применяются в каналах связи самого разного вида. Учитывая, что источники помех могут иметь различный характер, алгоритмы реализации помехоустойчивой защиты не универсальны и могут различаться в зависимости от ситуации. Целью статьи является построение имитационной модели канала связи.

Основная часть. Помехоустойчивое (канальное, избыточное, корректирующее) кодирование используется для выявления и исправления ошибок, возникающих при передаче данных через канал связи. Теория помехоустойчивого кодирования берет свое начало в исследованиях, выполненных Клодом Шенноном [1]. В своем фундаментальном труде он сформулировал теорему, согласно которой для любого дискретного канала с шумами существует такой код, который позволяет передавать информацию с вероятностью ошибки, стремящейся к нулю. Однако это условие выполняется лишь в том случае, если скорость передачи данных не превышает пропускную способность данного канала.

Одним из ключевых аспектов повышения помехоустойчивости является введение избыточности в передаваемую информацию. Этот подход основан на применении специально выбранного подмножества кодовых комбинаций из всего возможного множества, что позволяет значительно снизить вероятность возникновения ошибок при передаче. Такие коды называются избыточными или корректирующими, поскольку они предназначены для обнаружения и исправления ошибок, возникающих в процессе передачи данных. Их характеристики определяются множеством параметров, включая длину кодового слова, число разрядов и степень избыточности. Внедрение подобных кодов позволяет минимизировать вероятность искажения информации и повысить надежность передачи в условиях воздействия помех. Процесс целенаправленного увеличения информационной избыточности с целью повышения устойчивости к внешним помехам называется помехоустойчивым кодированием. Процесс, противоположный кодированию, называется декодированием, в ходе которого исходные данные восстанавливаются из полученного кодового слова, даже если в нём присутствуют ошибки. Одним из важнейших достоинств методов помехоустойчивого кодирования является способность снижать влияние помех за счет усреднения шумовых искажений. Данный эффект достигается благодаря тому, что дополнительные биты формируются на основе информации сразу о нескольких символах передаваемого сообщения [2]. В современных цифровых системах связи процессы кодирования и декодирования реализуются специализированными аппаратными или программными модулями, известными как кодеры и декодеры. Их использование позволяет значительно повысить надежность передачи данных. Состав цифровой системы связи представлен на рис. 1.

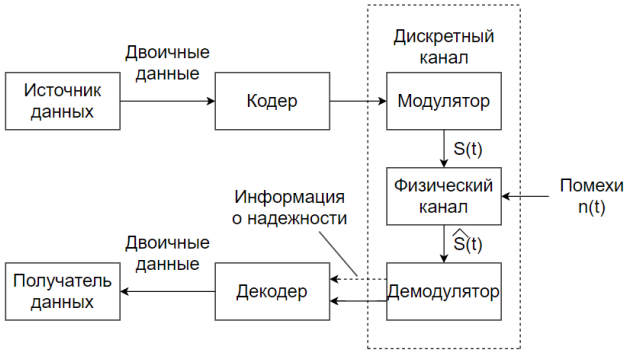

Рис. 1. Состав цифровой системы связи

Помехоустойчивый код отличается от простого тем, что в канал передаются лишь определенные комбинации кодов, соответствующие заданным критериям. Из всего множества возможных кодовых последовательностей выделяются допустимые, которые выбираются на основе заданных характеристик. Именно эти комбинации используются для передачи данных через канал связи. Для двоичного кода всё множество комбинаций равно 2^n, где n — количество разрядов в кодовом слове. Этот массив разделяется на два: разрешённый и запрещённый. Эти массивы хранятся как в передатчике, так и в приёмнике сообщения. Имитационное моделирование основывается на предварительном создании математической модели исследуемого объекта. Одни и те же реальные каналы могут быть описаны разными математическими моделями в зависимости от исследуемых характеристик. Реальные каналы связи обладают разнообразными свойствами, зависящими от множества факторов, что делает их математическое моделирование весьма сложным.

При анализе различных подходов к проектированию систем связи и прогнозированию их параметров без проведения непосредственных экспериментов особое значение приобретает учёт характеристик каналов, через которые передается информация. Для того чтобы обеспечить точное представление о таких каналах, используются

их математические модели, позволяющие оценить основные параметры и спрогнозировать возможные искажения при передаче данных. При этом важно понимать разницу между полной моделью канала и его упрощённым описанием. Частичное описание охватывает лишь определенные характеристики, которые актуальны в конкретных условиях для узкого круга задач. Полноценная же модель канала должна учитывать все ключевые аспекты передачи сигнала. К основным требованиям, предъявляемым к таким моделям, относят удобство их применения и соответствие реальным экспериментальным данным. Однако из-за высокой сложности реальных каналов связи добиться одновременно и высокой точности, и простоты использования бывает затруднительно. Поэтому при разработке моделей приходится искать баланс между детализацией и практической применимостью. В общем случае модель реального канала можно выразить в виде математического описания сигналов, поступающих на вход, сигналов, выходящих из канала, а также взаимосвязей между ними. Глубокий анализ внутренних процессов при этом, как правило, не является необходимым [3]. Далее будут представлены основные модели канала связи.

Одной из наиболее простых и широко используемых моделей является двоичный симметричный канал (ДСК), графическое представление которого приведено на рис. 2. Данная модель используется для характеристики передачи данных при двоичной модуляции в условиях случайных помех. В такой системе выходной сигнал формируется как сумма входного сигнала, шумовой составляющей и результата обработки демодулятором. Именно это позволяет учитывать возможные искажения в процессе передачи информации.

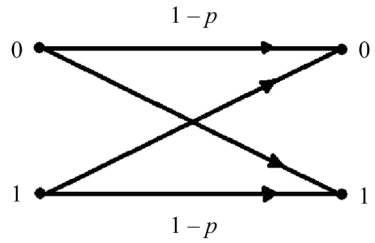

Рис. 2. Двоичный симметричный канал

Характеристики ДСК описываются с помощью вероятностных величин, определяющих вероятность того, что на выходе канала будет получен определенный символ Y при передаче входного символа X. Вероятности для ДСК определяются следующим соотношением:

$$P(Y = 0|X = 0) = P(Y = 1|X = 1) = p - 1,$$

где p — средняя вероятность искажения символа.

Любой физический канал связи подвержен помехам. Их влияние на точность и целостность передачи информации может иметь разный характер, такой как внесение единичных помех или каскадов ошибок. В качестве кодеров и декодеров рассмотрим алгоритмы, такие как код Хэмминга, код с повторением и код Рида-Маллера. Код Хэмминга является самоконтролирующимся и самокорректирующимся. Это значит, что код может самостоятельно корректировать одиночные ошибки и находить двойные ошибки [4]. В процессе использования таких кодов информация передается блоками фиксированной длины, причем каждый блок подвергается процедурам кодирования и декодирования независимо от остальных. В каждом блочном коде символы делятся на два типа — информационные и проверочные. Код Хэмминга способен исправлять по одной ошибке в каждом слове. Основным параметром кода Хэмминга является величина r, от которой зависят следующие характеристики: n — общее число символов в кодовом слове, а k — количество информационных символов. Эти параметры рассчитываются следующим образом:

$$n = 2r - 1,$$
$$k = 2r - 1 - r.$$

Это означает, что каждое кодовое слово включает k информационных и r проверочных символов. Для каждого количества проверочных символов r существует стандартная разновидность кода Хэмминга с определенной маркировкой. В случае, если значение отличается от стандартных параметров, применяется усеченный вариант кода. Например, в международной системе телеграфного кодирования МТК-2 используется код с параметрами $k = 5$. Для него используется код Хэмминга, представляющий собой укороченную версию классического кода.

Код с повторением — это один из наиболее простых в реализации помехоустойчивых кодов, характеризующийся высокой избыточностью и зависящий от одного параметра n, определяющего количество повторений каждого символа. Данный параметр должен быть больше 2. Принцип кодирования заключается в том, что каждый символ кодируемой последовательности дублируется n раз, что позволяет гарантированно исправлять до $[n\ 2]$ — 1 ошибок в каждом кодовом слове. В результате кодирования образуется лишь два кодовых слова: одно состоит из n нулей, а другое — из n единиц. При этом первый символ в кодовом слове играет роль информационного, тогда как остальные символы выполняют функцию проверочных битов. Все проверочные символы идентичны информационному биту, обеспечивая простоту декодирования и высокую устойчивость к одиночным ошибкам.

https://mid-journal.ru

Алгоритм работы декодера заключается в анализе поступившей кодовой последовательности. Он вычисляет количество нулей и единиц, содержащихся в кодовом слове. Если число нулей превышает количество единиц, декодер интерпретирует бит как 0. В противоположной ситуации, когда единиц больше, принимается значение 1 [5]. В случае равенства количества нулей и единиц фиксируется ошибка декодирования, либо результирующий бит определяется случайным образом, в зависимости от реализации алгоритма.

Такой метод позволяет корректно декодировать данные, если количество ошибок в кодовом слове не превышает половины его длины. Если же шум в канале затрагивает ровно половину символов, декодер оказывается неспособен однозначно определить исходный бит. При превышении этого порога возрастает вероятность ошибочного декодирования, поскольку принимаемое значение не соответствует изначально переданной информации. Однако, если ошибки в канале случаются редко, вероятность отказа или неверного декодирования для кода с повторением значительной длины остается минимальной.

Код Рида–Маллера обозначается как $RM(r, m)$. Его параметрами являются два числа r и m, такие что $m \geq r \geq 0$. R — порядок кода, 2^m — длина кода. Как и во многих других алгоритмах кодирования, кодовое слово строится путём умножения информационного слова на порождающую матрицу.

Коды Рида-Маллера можно условно разделить на коды 0-го, 1-го и r-го порядка в зависимости от использующегося параметра r. Самый простой случай — коды нулевого порядка. В этом случае порождающая матрица кода $RM(0, m)$ порядка 0, обозначаемая $G_{0,m}$, является строкой из 2^m единиц. Кодовое слово при этом должно иметь длину 1, а кодовым словом будет вектор, состоящий из 2^m бит, полностью состоящий битов информационного слова — из нулей или единиц. Декодирование при этом происходит способом, аналогичным декодированию кода с повторением. Такое кодирование обладает большой избыточностью, так как на каждый бит информационного слова будет приходиться 2^m кодового слова.

Коды Рида–Маллера первого порядка формируются с использованием порождающей матрицы G, содержащей m строк и 2^m столбцов. При этом каждый столбец соответствует двоичному представлению его порядкового номера. В качестве примера ниже приведена порождающая матрица G для кода Рида–Маллера 1-го порядка $G_{1,4}$:

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Строки матрица G_1, m являются линейно независимыми. Доказать это можно, построив квадратную матрицу из столбцов, в каждом из которых количество единиц меньше 3. Для случая $m = 4$ такая матрица размещена ниже. Все столбцы этой матрицы, очевидно, линейно независимые.

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Коды Рида–Маллера порядка r — общий случай при случайно взятом $r \leq m$ [6]. Порождающая матрица $G_{r,m}$, строится сверху вниз и имеет размер $k \cdot 2^m$. Т.е. код $RM(r, m)$ состоит из 2^k слов.

Для моделирования канала связи необходимо имитировать источник помех, который вносит ошибки в передаваемое сообщение. Так как характер появления ошибок различен в зависимости от физической природы канала связи и условий передачи сообщения, для имитации реального характера появления ошибок требуется использования различных алгоритмов, которые имитируют появление ошибок в реальных каналах связи. Далее будут представлены модели источников ошибок, использованные при реализации программного обеспечения в рамках данной дипломной работы. Для описания источника ошибок будет использована следующая схема [7].

Рассмотрим двоичный симметричный стационарный канал с идеальной синхронизацией, который может находиться в одном из K несовместных состояний. Пусть ε_j — вероятность ошибки в состоянии j. Считается, что последовательность состояний канала c_j является простой цепью Маркова. Поэтому статистика ошибок полностью задаются матрицей переходных вероятностей P цепи Маркова, представленной далее, и значениями вероятностей ошибок в каждом из состояний.

$$P = \left\| p_{i,j} \right\| = \begin{Vmatrix} p_{0,0} & p_{0,1} & \cdots & p_{0,K-1} \\ p_{1,0} & \cdots & \cdots & p_{1,K-1} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ p_{K-1,0} & p_{K-1,1} & \cdots & p_{K-1,K-1} \end{Vmatrix}.$$

https://mid-journal.ru

Вероятность ошибки в канале вычисляется с использованием следующей формулы:

$$p_{er} = \sum_{c=0}^{K-1} P_c \varepsilon_c,$$

где P_c — финальные вероятности состояний, которые однозначно определяются по матрице P.

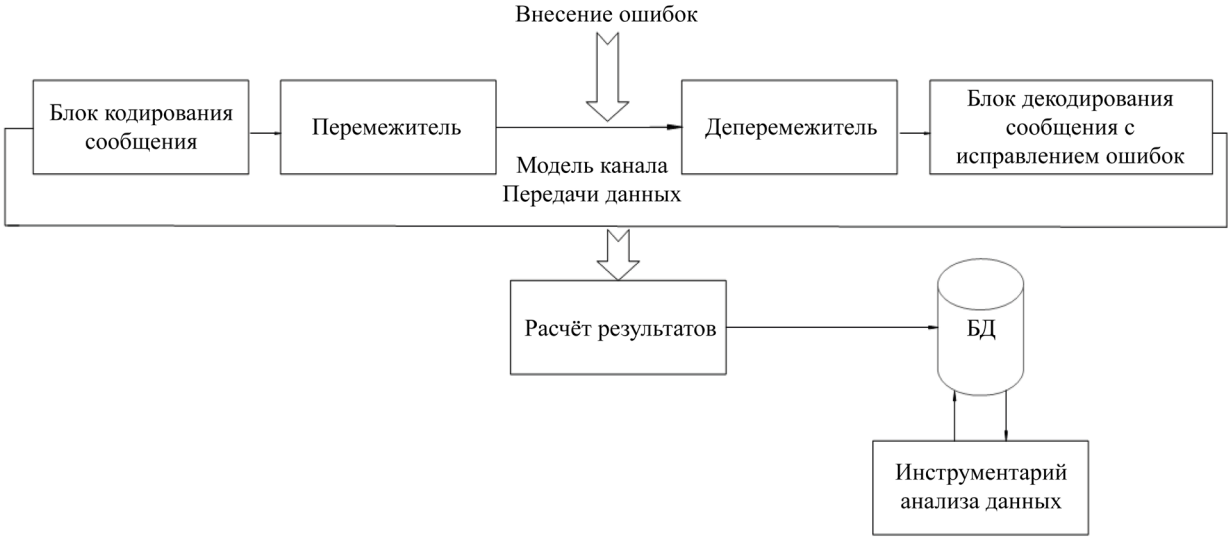

Рис. 3. Общая схема работы имитационной модели канала связи

Заключение. Имитация канала связи представляет собой модуль, который вносит ошибки в закодированное сообщение в соответствии с выбранным алгоритмом для источника ошибок. Для успешной работы имитации канала необходимо заранее установить параметры источника ошибок. Декодирование принятого сообщения с ошибками, возникающими в результате имитации канала связи, осуществляется с помощью алгоритмов помехоустойчивого кодирования. При этом применяются те же алгоритмы, которые использовались для кодирования, однако в обратной последовательности. В результате процесса декодирования происходит исправление ошибок, эффективность которого напрямую зависит от характеристик источника ошибок, его параметров, выбранного каскада кодеков и параметров каждого из них.

Модуль работы с базой данных обеспечивает сохранение полученных результатов в базе данных и предоставляет возможность вывода результатов экспериментов по имитационному моделированию канала связи для выбранного канала, если такие эксперименты были проведены. Кроме того, он позволяет выбрать наиболее эффективный кодек на основании одного из следующих критериев: процент исправленных ошибок, скорость кодирования, скорость декодирования и увеличение размера файла в процессе кодирования.

Таким образом, совокупность данных компонентов создает полноценную имитационную модель канала связи, а также предоставляет возможность решать задачи по подбору наиболее эффективного кодека для выбранного канала связи и изучать свойства выбранного кодека.

Список литературы

1. Гуменюк А.С. *Теория информации и кодирования.* Омск: Омский государственный технический университет; 2015. 123 с.

2. Владимиров С.С. *Математические основы теории помехоустойчивого кодирования.* Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича; 2016. 96 с.

3. Кловский Д.Д. (ред.), Зюко А.Г., Назаров М.В. Коржик В.И. *Теория электрической связи.* Москва: Радио и связь; 1999. 432 с.

4. Назаренко Ю.Л., Гудзя Е.П., Середы Е.Р., Черкесовой Л.В. Исследование влияния параметров кодов Хэмминга на исправляющую способность в каскадных кодах. *European Science.* 2017;(28):1–4.

5. Берлекэмп Э. *Алгебраическая теория кодирования.* Москва: Мир; 1971. 477 с.

6. Иванюк А.А., Мусин С.Б. *Специальные главы высшей математики: теория помехоустойчивого кодирования.* Минск: Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники; 2007. 32 с.

7. Деундяк В.М., Могилевская Н.С. *Математическое моделирование источников ошибок цифровых каналов передачи данных.* Учебное пособие. Ростов-на-Дону: Донской государственный технический университет; 2006. 96 с.

https://mid-journal.ru

Об авторе:

Татьяна Александровна Исакова, студент кафедры кибербезопасности информационных систем Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), isakovatttt@yandex.ru

Конфликт интересов: **автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.**

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

About the Author:

Tatyana A. Isakova, Student of the Cybersecurity of Information Systems Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), isakovatttt@yandex.ru

Conflict of Interest Statement: **the author declares no conflict of interest.**

The author has read and approved the final manuscript.