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 предназначен 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 доспупа", "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 ВВЕЛЕНИЕ	4
2. Теоретическая часть.	4
3. Практическая часть	6
ЛИТЕРАТУРА	

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 Eb/N₀, находящемся в пределах от 0,2 до 2,5 дБ, для достижения Pb= 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 Практичекая 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 Турбокодов (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.

Source Block Parameters: Bernoulli Binary Generator
Bernoulli Binary Generator
Generate a Bernoulli random binary number. To generate a vector output, specify the probability as a vector.
Parameters
Probability of a zero: 0.5
Initial seed: 12345
Sample time: 1/3568
Frame-based outputs
Samples per frame: 3568
Output data type: double 🔹
OK Cancel Help Apply

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 К» - количество информационных бит.

🔁 Function Block Parameters: Кодер Рида-Соломона	×
Binary-Input RS Encoder (mask) (link)	^
Encode the message in the input vector using an (N,K) Reed- Solomon encoder with the narrow-sense generator polynomial. This block accepts a column vector input signal with an integer multiple of K*ceil(log2(N+1)) bits. Each group of K*ceil(log2(N+1)) input bits represents one message word to be encoded.	
If log2(N+1) does not equal M, where $3 \le M \le 16$, then a shortened code is assumed. If the Primitive polynomial is not specified, then the length by which the codeword is shortened is $2^c(\log_2(N+1)) - (N+1)$. If it is specified, then the shortening length is $2^(length(Primitive polynomial)-1) - (N+1)$.	
Parameters	
Codeword length N:	
255	
Message length K:	
223	
Specify primitive polynomial	
Specify generator polynomial	
Puncture code	
Output data type: Same as input	~
OK Cancel Help Appl	y

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).

🗈 Function Block Parameters: Турбо-кодер 🛛 🗙
Turbo Encoder (mask) (link)
Encode the binary data using a parallel concatenated coding scheme that employs the convolutional encoder as the constituent encoder.
Both the constituent encoders use the same trellis structure.
The block punctures the second systematic bit stream and appends the termination bits at the end of the encoded data bits.
Use the poly2trellis function to create a trellis using the constraint length, code generator (octal) and feedback connection (octal).
Parameters
Trellis structure:
poly2trellis(7, [133 171], 133)
Interleaver indices:
[4080:-1:1].
OK Cancel Help Apply
OK Calicel Help Apply

Рис. 7 - Параметры блока «Turbo Encoder»

«Trellis structure» - структура треллис-модуляции.

Треллис-модуляция (TCM – 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-кодовая 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).

1	unction Block	c Parameters: Модулятор M-QAM	
Rectan	gular QAM Modu	lator Baseband	
Modulat modula	te the input signation method.	al using the rectangular quadrature amplitude	
This blo	This block accepts a scalar or column vector input signal.		
The inp 'Input ty multiple	ut signal can be /pe' parameter t e of the number o	either bits or integers. When you set the to 'Bit', the input width must be an integer of bits per symbol.	
Main	Data Types		
Param	eters		
M-ary	number:	64	
Input t	ype:	Bit	
Conste	llation ordering:	Binary -	
Norma	lization method:	Min. distance between symbols 🔹	
Minimu	ım distance:	2	
Phase	offset (rad):	0	
		View Constellation	
	ОК	Cancel Help Apply	

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.

			64-QAM,Bina	ry Mapping,Ph.Off.=0	rad,Min.Dist=2,Output I	DT=double		
0	000000	001000	010000	011000	100000	101000	110000	111000
	×	×	×	×	×	×	×	×
6	000001	001001	010001	011001	100001	101001	110001	111001
	×	×	×	×	×	×	×	×
4	000010	001010	010010	011010	100010	101010	110010	111010
	×	×	X	×	×	×	×	×
	000011	001011	010011	011011	100011	101011	110011	111011
	×	×	X	×	×	×	×	×
	000100	001100	010100	011100	100100	101100	110100	111100
	×	×	×	×	×	×	¥	×
-2 =	000101	001101	010101	011101	100101	101101	110101	111101
	×	×	X	×	×	×	x	X
-4	000110	001110	010110	011110	100110	101110	110110	111110
	×	×	×	×	×	×	×	×
-0	000111	001111	010111	011111	100111	1011111	110111	111111
	×	×	×	×	×	×	×	X
-8	-6	-4	-2	0 In-phase A	mplitude 2	4	6	8

Рис. 10. Диаграмма построения созвездий

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

«Variance» - считывает параметр Eb/N0 из блока Model Parameters.

🗈 Function Block Parameters: Канал с шумом 🛛 🗙
AWGN Channel (mask) (link)
Add white Gaussian noise to the input signal. The input signal can be real or complex. This block supports multichannel processing.
When using either of the variance modes with complex inputs, the variance values are equally divided among the real and imaginary components of the input signal.
Parameters
Input processing: Columns as channels (frame based)
Initial seed:
96745
Mode: Variance from mask
Variance:
prmPccc.noiseVar
OK Cancel Help Apply

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 параметры, 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).

🞦 Function Block Parameters: Турбо-декодер 🛛 🔀
Turbo Decoder (mask) (link)
Decode the input using a parallel concatenated decoding scheme that employs the a posteriori probability (APP) decoder as the constituent decoder.
Both the constituent decoders use the same trellis structure and algorithm.
Use the poly2trellis function to create a trellis using the constraint length, code generator (octal) and feedback connection (octal).
Parameters
Trellis structure:
poly2trellis(7, [133 171], 133)
Interleaver indices:
[4080:-1:1].'
Decoding algorithm: True APP 🔹
Number of decoding iterations:
6
OK Cancel Help Apply

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 деперемежитель. 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 неправильной 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 (РС);
- 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 (РС).

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 (PC). Модель позволяет исследовать работу каскадных кодов. В качестве внешнего кода используется код Рида-Соломона, в качестве внутреннего – Турбо-код на базе свёрточного кодирования и треллисмодуляции. 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.