

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ОБРАТНОГО КАНАЛА В БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЯХ СВЯЗИ

В. С. Томашевич

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. М. А. Бонч-Бруевича, 191186, Санкт-Петербург, Россия

УДК 621.391.28

В современных беспроводных сетях применяются адаптивные схемы модуляции и кодирования для максимизации пропускной способности. Основываясь на текущем качестве канала (отношение сигнал/шум), приемник передает по обратному каналу связи передающей стороне информацию об оптимальном наборе схем модуляции и кодирования. Однако необходимо учитывать, что обратный канал также подвержен ошибкам и неверно принятая передатчиком информация приводит к выбору неоптимальной схемы передачи. Рассматриваются свойства помехоустойчивого кода, применяемого для защиты обратного канала в стандарте HSDPA. Показано, что ошибки в старших битах CQI-слова (информация о состоянии канала) оказывают более негативное воздействие на пропускную способность системы, чем ошибки в младших битах CQI-слова. Предложен простой способ декодирования по принципу максимального правдоподобия.

Ключевые слова: информация о состоянии канала, отношение сигнал/шум, высокоскоростной пакетный доступ по нисходящему каналу, помехоустойчивое кодирование, коды Рида – Малера.

Modern wireless networks make use of adaptive coding and modulation schemes to maximize the throughput. Channel state information (CQI) is feedback from receiver to transmitter via a feedback channel, allowing the transmitter to choose optimal coding and modulation mode. However, the feedback channel is itself error prone and reception of wrong channel state information affects the transmitter's choice. This paper addresses the properties of forward error correcting code used on the HSDPA feedback channel. It is shown, that the errors in the most significant bits of the CQI-word have more impact on the system throughput as the errors in the least significant bits of the CQI-word. A simple maximum likelihood decoding algorithm is then proposed.

Key words: channel state information, signal-to-noise ratio, high speed downlink packet access, error correcting codes, Reed – Muller codes.

Введение. Перспективные сети связи будут представлять собой комбинацию беспроводных и проводных сетей, в которых передаются все виды трафика, каждый из которых будет предъявлять собственные требования к параметрам качества обслуживания. "Узким местом" таких сетей является беспроводная линия связи. Вследствие различных физических эффектов, имеющих место в беспроводной связи (многолучевое распространение, эффект Доплера), пропускная способность системы в целом может претерпевать значительные изменения. Для борьбы с этими эффектами в беспроводных сетях применяются адаптивная модуляция и кодирование. В зависимости от текущего (в реальном времени) качества канала необходимо выбрать такую комбинацию схем модуляции и кодирования, которая будет обеспечивать приемлемую вероятность ошибки. Основываясь на текущем качестве канала (отношение сигнал/шум), приемник передает по обратному каналу связи передающей стороне информацию об оптимальном наборе схем модуляции и кодирования.

Проблема состоит в том, что обратный канал связи также подвержен ошибкам, поэтому неправильно принятая передатчиком информация приводит к выбору неоптимальной схемы модуляции и кодирования, что, естественно, снижает общую пропускную способность системы. Следовательно, необходимо исследовать свойства помехоустойчивых кодов, применяемых для защиты от ошибок информации, передаваемой по обратному каналу связи. В работе рассматривается алгоритм декодирования информации обратного канала и проводится анализ его характеристик. Данная работа

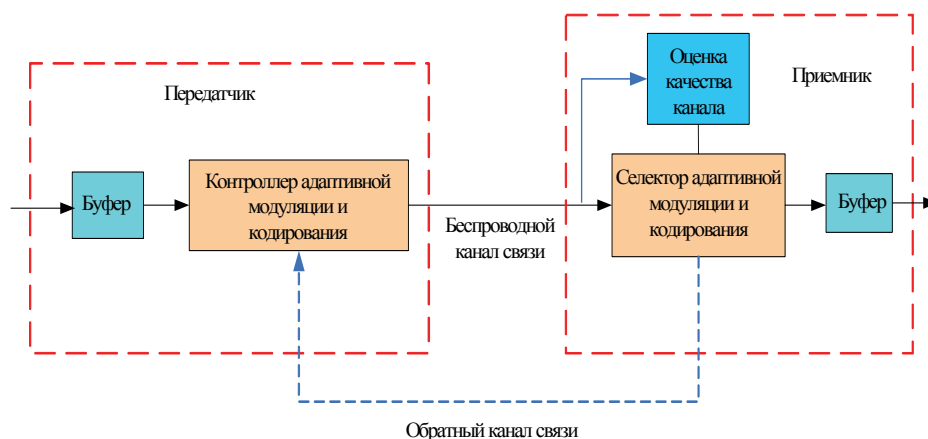


Рис. 1. Модель беспроводной системы связи

основана на стандарте HSDPA (high-speed downlink packet access – высокоскоростной пакетный доступ по нисходящему каналу), принятом в системах сотовой связи третьего поколения UMTS.

1. Описание модели беспроводной системы связи третьего поколения. На рис. 1 представлена обобщенная схема беспроводной системы связи. В базовой станции на передающей стороне установлен контроллер адаптивной модуляции и кодирования. В абонентском терминале на приемной стороне установлен селектор адаптивной модуляции и кодирования. Селектор, основываясь на текущем отношении сигнал/шум, выбирает комбинацию схем модуляции и кодирования и передает служебную информацию по обратному каналу контроллеру.

В стандарте HSDPA для обратной связи применяется высокоскоростной выделенный контрольный канал (HS-DPCCH). Временная структура сигнала в данном канале представлена на рис. 2. Каждый кадр длительностью 2 мс состоит из трех слотов по 2560 широкополосных элементов (чипов) каждый. В первом слоте размещается информация подтверждения автоматической передачи (HARQ-ACK); два последующих слота занимает информация о качестве канала CQI (channel quality indicator) [1].

Возможные схемы модуляции и кодирования определяются параметром CQI, имеющим значения от 0 до 30; таким образом, стандарт определяет до 31 различной схемы модуляции и кодирования.

2. Оценки помехоустойчивости обратного канала HS-DPCCH. Пусть информация о качестве канала защищена помехоустойчивым кодом, представляющим собой линейный блочный код с параметрами (20, 5). Кодированная матрица данного кода представлена в таблице [2]. Известно, что данный код получен из кода Рида – Малера с параметрами (32, 6).

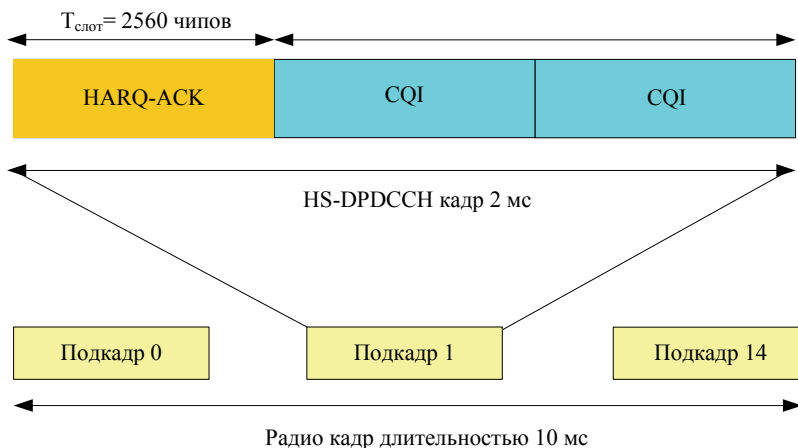


Рис. 2. Структура кадра в канале HS-DPCCH

Кодирующая матрица кода (20, 5)

i	$M_{i,0}$	$M_{i,1}$	$M_{i,2}$	$M_{i,3}$	$M_{i,4}$
0	1	0	0	0	1
1	0	1	0	0	1
2	1	1	0	0	1
3	0	0	1	0	1
4	1	0	1	0	1
5	0	1	1	0	1
6	1	1	1	0	1
7	0	0	0	1	1
8	1	0	0	1	1
9	0	1	0	1	1
10	1	1	0	1	1
11	0	0	1	1	1
12	1	0	1	1	1
13	0	1	1	1	1
14	1	1	1	1	1
15	0	0	0	0	1
16	0	0	0	0	1
17	0	0	0	0	1
18	0	0	0	0	1
19	0	0	0	0	1

Кодирующую матрицу обозначим через G_{cqi} :

$$G_{cqi} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Стандарт HSDPA не определяет способ декодирования помехоустойчивого кода в обратном канале. Способ декодирования, рассмотренный в данной работе, является одним из методов декодирования кодов Рида – Малера.

2.1. *Декодирование кодов Рида – Малера.* Кодовая матрица любого кода Рида – Малера имеет специфическую структуру: первая строка матрицы состоит из всех единиц, а столбцы матрицы представляют собой двоичные числа в возрастающем порядке [3]. В качестве примера рассмотрим кодирующую матрицу $G(1,3)$ кода Рида – Малера с параметрами (8, 4):

$$G(1,3) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}.$$

В данной работе рассматривается способ декодирования, основанный на матрицах Адамара. Рассмотрим матрицу Адамара размером 8×8 :

$$H_8 = \begin{bmatrix} +1 & +1 & +1 & +1 & +1 & +1 & +1 & +1 \\ +1 & -1 & +1 & -1 & +1 & -1 & +1 & -1 \\ +1 & +1 & -1 & -1 & +1 & +1 & -1 & -1 \\ +1 & -1 & -1 & +1 & +1 & -1 & -1 & +1 \\ +1 & +1 & +1 & +1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ +1 & -1 & +1 & -1 & -1 & +1 & -1 & +1 \\ +1 & +1 & -1 & -1 & -1 & -1 & +1 & +1 \\ +1 & -1 & -1 & +1 & -1 & +1 & +1 & -1 \end{bmatrix}.$$

Все коды Рида – Малера первого порядка имеют следующую особенность: их кодовые слова являются строками положительной и отрицательной матриц Адамара размером $2^m \times 2^m$ (m – число информационных битов минус единица). Изменим элементы этих матриц в соответствии с правилом

$$+1 \rightarrow 1, \quad -1 \rightarrow 0.$$

В результате получим следующие матрицы Адамара (положительную и отрицательную):

$$H_8 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad -H_8 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Легко проверить, что строки этих двух матриц представляют все 16 возможных кодовых слов кода Рида – Малера с кодирующей матрицей $G(1,3)$. В качестве примера рассмотрим два информационных слова $\mathbf{u}_0 = [0 \ 1 \ 1 \ 0]$ и $\mathbf{u}_1 = [1 \ 1 \ 1 \ 0]$. Тогда соответствующие кодовые слова $\mathbf{w}_0, \mathbf{w}_1$ определяются следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} \mathbf{w}_0 &= \mathbf{u}_0 \times G_{1,3} = [0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0], \\ \mathbf{w}_1 &= \mathbf{u}_1 \times G_{1,3} = [1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1]. \end{aligned}$$

Очевидно, что кодовые слова \mathbf{w}_0 и \mathbf{w}_1 являются строками матриц $-H_8$ и H_8 . Также очевидно, что два этих кодовых слова дают отрицательную максимальную корреляцию:

$$\mathbf{w}_0 \times \mathbf{w}_1^T = [-1 \ +1 \ +1 \ -1 \ -1 \ +1 \ +1 \ -1] \times \begin{bmatrix} +1 \\ -1 \\ -1 \\ +1 \\ +1 \\ -1 \\ -1 \\ +1 \end{bmatrix} = -8.$$

При условии, что все кодовые слова являются строками положительной и отрицательной матриц Адамара, возможно жесткое декодирование методом максимального правдоподобия путем вычисления элементов корреляции принятого кодового слова со всеми строками матрицы Адамара:

$$\hat{r} = H_8 \cdot \mathbf{r}^T.$$

После вычисления элементов корреляции \hat{r} необходимо определить максимальный элемент корреляции \hat{r}_j . Тогда индекс этого элемента j укажет на максимально правдоподобное кодовое слово или строку H_8 ($-H_8$). Пусть принято кодовое слово $r = [+1 \ +1 \ -1 \ +1 \ +1 \ +1 \ -1 \ -1]$. Вычислив \hat{r}_j , получаем

$$\hat{r} = H_8 \cdot \mathbf{r}^T = [+2 \ -2 \ +6 \ +2 \ +2 \ -2 \ -2 \ 0].$$

Максимальное значение элемента корреляции $\hat{r}_j = +6$, следовательно, переданное кодовое слово является второй строкой матрицы H_8 :

$$\mathbf{w} = [+1 \ +1 \ -1 \ -1 \ +1 \ +1 \ -1 \ -1].$$

Рассмотрим мягкое декодирование. Пусть было передано кодовое слово

$$\mathbf{w} = [+1 \ -1 \ -1 \ +1 \ -1 \ +1 \ +1 \ -1].$$

Принятое кодовое слово \mathbf{r} будет содержать не дискретные значения (+1, -1), а реальные значения принятого сигнала:

$$\mathbf{r} = [+1 \ +0,34 \ -0,65 \ +1,15 \ +0,56 \ +0,31 \ -0,06 \ -0,85].$$

Вычислив $\hat{r} = H_8 \cdot \mathbf{r}^T$, получаем

$$[+1,8 \ -1,91 \ +2,62 \ +1,92 \ +1,38 \ +2,18 \ -1,06 \ +3].$$

Максимальный элемент корреляции $\hat{r}_j = +3$, следовательно, передано кодовое слово

$$\mathbf{w} = [+1 \ -1 \ -1 \ +1 \ -1 \ +1 \ +1 \ -1].$$

2.2. Результаты исследования помехоустойчивости обратного канала в системе HSDPA. Характеристики вероятности битовых ошибок получены на основе имитационного моделирования с использованием MATLAB для блочного кода (20, 5) в канале HS-DPCCH, а также наиболее близких по своим свойствам к данному коду кодов Рида – Малера (16, 5) и (32, 6). На рис. 3 представлена зависимость вероятности битовых ошибок (bit error rate (BER)) от отношения сигнал/шум при мягком декодировании для канала с аддитивным гауссовым белым шумом, на рис. 4 – вероятности ошибок старшего бита для гауссова канала.

На рис. 5 представлена зависимость вероятности битовых ошибок от отношения сигнал/шум при мягком декодировании для рэлеевского канала, на рис. 6 – зависимость вероятности ошибок в старшем бите от отношения сигнал/шум для рэлеевского канала.

Из рис. 3, 5 следует, что блочный код (20, 5), используемый в схеме защиты информации о качестве канала, имеет практически те же характеристики, что и код Рида – Малера (16, 5). Однако из рис. 4, 6 следует, что анализируемый блочный код (20, 5), применяемый для защиты от ошибок в обратном канале, обеспечивает лучшую защиту от ошибок для старших битов информационных слов, чем код Рида – Малера (16, 5). Этот результат является достаточно важным, поскольку именно ошибка в старшем бите информационного слова приводит к инверсии значения CQI, что в свою очередь определяет выбор худшего формата передачи в нисходящем канале связи для данного качества канала.

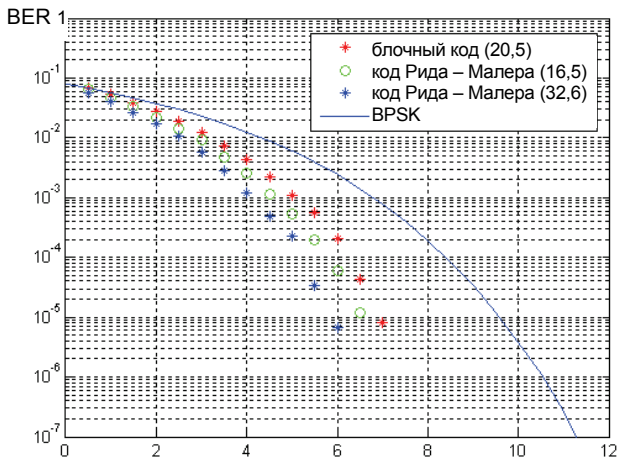


Рис. 3. Зависимость вероятности битовых ошибок для различных кодов от отношения сигнал/шум в гауссовом канале

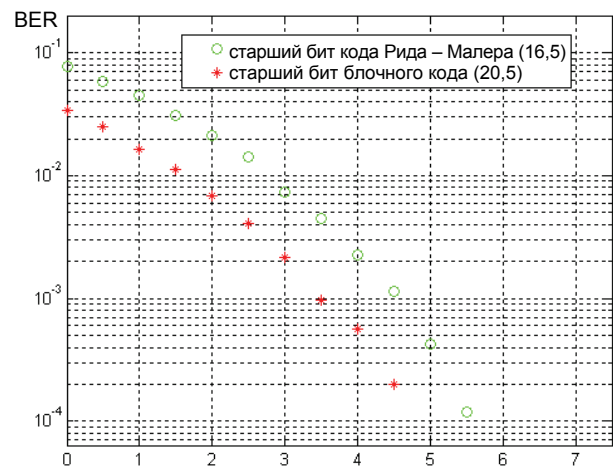


Рис. 4. Зависимость вероятности ошибок старшего бита от отношения сигнал/шум в гауссовом канале

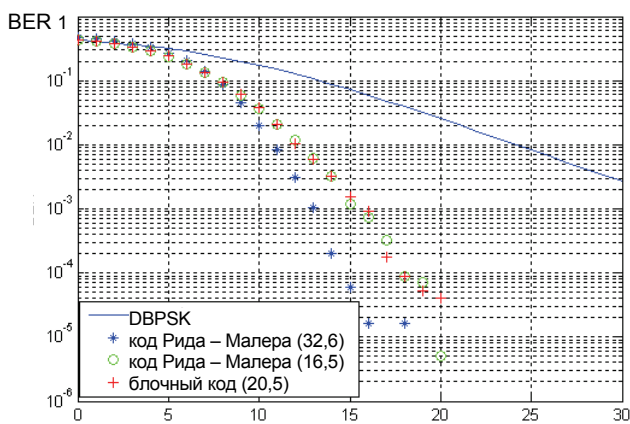


Рис. 5. Зависимость вероятности битовых ошибок для различных кодов от отношения сигнал/шум в рэлеевском канале

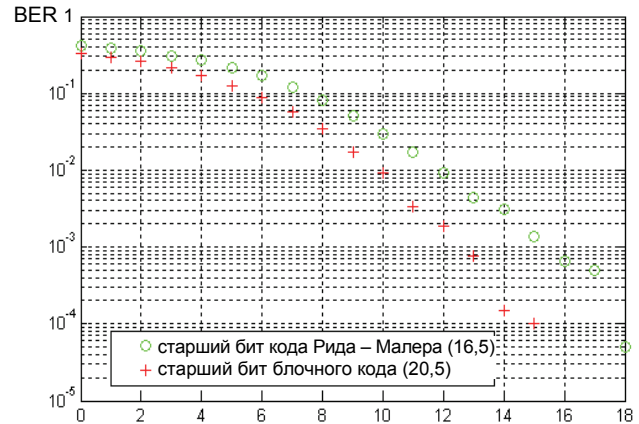


Рис. 6. Зависимость вероятности ошибки старшего бита от качества канала для различных кодов в канале рэлеевских замираний

Заключение. В данной работе рассмотрены свойства помехоустойчивого кода, применяемого для защиты информации о качестве канала в стандарте HSDPA. Для кода, являющегося разновидностью кода Рида – Малера, предложен простой способ декодирования по принципу максимального правдоподобия. Получены зависимости вероятности битовых ошибок от отношения сигнал/шум для канала с аддитивным гауссовым белым шумом и для канала рэлеевских замираний, доказывающие эффективность предложенного кода для защиты служебной информации в обратном канале.

Список литературы

1. 3GPP. Physical channel and mapping of transport channels onto physical channels (FDD). TS 25.211, 3rd Generation Partnership Project (3GPP).
2. 3GPP. Multiplexing and channel coding (FDD). TS 25.212, 3rd Generation Partnership Project (3GPP).
3. MCWILLIAMS F. J. The theory of error-correcting codes / F. J. McWilliams, N. J. A. Sloane. S. l.: North-Holland Publ. Co., 1972.

Томашевич Виктор Сергеевич – асп. Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. М. А. Бонч-Бруевича; e-mail: tomashevich@gmail.com

Дата поступления – 12.08.09