

ПРЯМАЯ КОРРЕКЦИЯ ОШИБОК В ТЕХНОЛОГИИ C-OFDM

Горьковский К.А.

*Горьковский Кирилл Андреевич – студент магистратуры,
кафедра средств связи и информационной безопасности,
Омский государственный технический университет, г. Омск*

Аннотация: в статье рассматриваются алгоритмы сверточного кодирования и сверточного декодирования Витерби, принцип их работы, а также пример формирования и декодирования сверточного кода.

Ключевые слова: C-OFDM, прямая коррекция ошибок, FEC, сверточное кодирование, Витерби, кодер, декодер, помехоустойчивое кодирование, треллис-диаграмма, обнаружение и исправление ошибок.

Как известно, технология C-OFDM выгодно отличается от других технологий и, прежде всего, от технологии OFDM наилучшими показателями помехоустойчивости. Благодаря этому качеству, на данный момент C-OFDM является лучшим выбором для передачи видео- и аудио-сигналов в режиме реального времени. За счет чего же достигается такая высокая помехоустойчивость? Дело в том, что технология C-OFDM основана на методе прямой коррекции ошибок FEC [1,4]. С учетом особенностей технологии OFDM, прямая коррекция ошибок в технологии C-OFDM включает в себя:

- сверточное кодирование высокоскоростного информационного потока перед стадией частотного перемежения;
- использование алгоритма сверточного декодирования Витерби.

Целью данной статьи является наиболее простое объяснение алгоритмов прямой коррекции ошибок в технологии C-OFDM.

Сверточное кодирование

Сверточный кодер представляет собой непрерывную последовательную машину, в которой выходные импульсные отклики зависят не только от информационных символов, подающихся на вход, но и от предыдущих символов на входе. Такая зависимость между символами в сверточном коде реализуется за счёт использования в кодере блока памяти, реализованного в виде регистра сдвига. Благодаря этому, главной особенностью сверточного кодирования является способность исправлять ошибки в момент декодирования принятой последовательности. На рисунке 1 изображен пример простого сверточного кодера [2, 130].

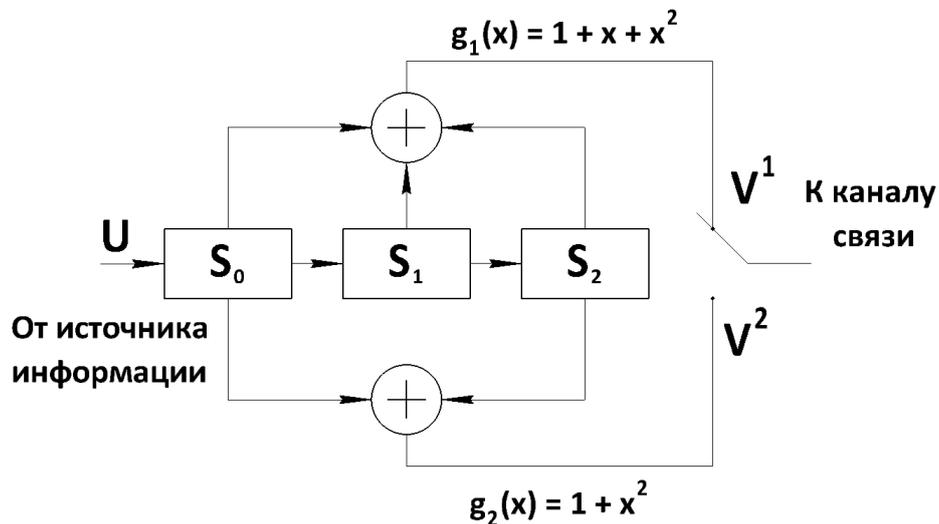


Рис. 1. Пример простого сверточного кодера

Ниже перечислены основные характеристики данного кодера:

- Количество элементов памяти (S_0, S_1, S_2, \dots) $m = 3$;
- Относительная скорость кода $R = k/n = 1/2$, где k – количество регистров сдвига (на вход одного регистра сдвига подается один информационный символ); n – количество импульсных откликов кодера (g_1, g_2, \dots).

На рисунке 2 изображена диаграмма состояний данного сверточного кодера. В вершинах данного графа перечислены все возможные состояния кодера (всего их $2^m = 8$). Ребра же отмечены метками $U(i)/V^2(i), V^1(i)$, где i – такт работы источника информации [2,132].

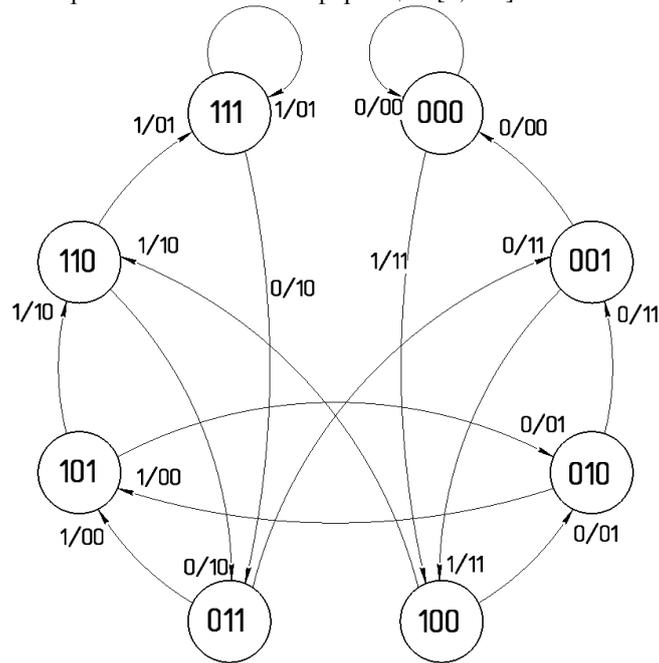


Рис. 2. Диаграмма состояний сверточного кодера

Пусть на вход данного кодера поступает информационная последовательность $U \rightarrow \{\dots 0101000110\}$. В таблице 1 представлен процесс формирования выходной последовательности данного кодера.

Таблица 1. Формирование выходной последовательности кодера

Номер такта работы кодера	Значение символа на входе	Состояние кодера	Выходная последовательность
1	0	000	00
2	1	000	1100
3	1	100	101100
4	0	110	10101100
5	0	011	1110101100
6	0	001	001110101100
7	1	000	11001110101100
8	0	100	0111001110101100
9	1	010	000111001110101100
10	0	101	01000111001110101100

Чаще всего для формирования кодовой последовательности пользуются треллис-диаграммами. На рисунке 3 изображена треллис-диаграмма кодера, изображенного на рисунке 1, где выделенный путь соответствует кодовой последовательности, сформированной при подаче на вход $U \rightarrow \{\dots 0101000110\}$.

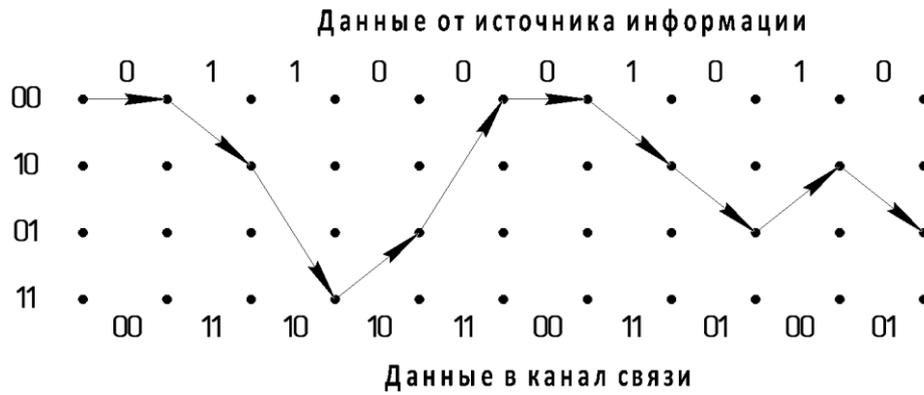


Рис. 3. Треллис-диаграмма сверточного кодера

В левой части диаграммы указаны состояния последних $m - 1$ разрядов регистра сдвига ($m=3$, соответственно указаны состояния ячеек S_1 и S_2). Состояние ячейки S_0 изменяется под действием входящих символов. Количество указанных разрядов также определяет число уровней в диаграмме ($2^{m-1} = 4$ уровня). Преимуществом треллис-диаграмм является идентичность анализа работы кодера и декодера [2, 134].

Алгоритм сверточного декодирования Витерби

Данный алгоритм декодирования основан на принципе максимального правдоподобия. Суть его заключается в нахождении наиболее подобного пути на треллис-диаграмме для принятой кодовой последовательности среди всех возможных. Для каждого состояния выбирается наиболее вероятный путь (с наименьшим расстоянием Хэмминга), называемый выжившим, а наименее вероятные пути отбрасываются [3,12].

В предыдущем разделе на вход сверточного кодера на рисунке 1 поступила информационная последовательность $U \rightarrow \{\dots 0101000110\}$, и в результате в канал связи была отправлена кодовая последовательность $U^* \rightarrow \{\dots 01000111001110101100\}$. Пусть данная кодовая последовательность была принята с ошибками в 5-ом и 10-ом разрядах, т.е. на вход декодера поступила последовательность $U_{ош} \rightarrow \{\dots 01000111000110111100\}$. На рисунке 4 изображена треллис-диаграмма сверточного декодера. Слева от решетки, располагаются все возможные состояния регистра сдвига. Для дальнейшего анализа необходимо условиться, что, если обрабатывается «0» - ребро графа отмечается пунктиром; если «1» - ребро графа рисуется сплошной линией.

Работа декодера всегда начинается с верхнего левого узла решетки. В зависимости от возможного состояния кодера, декодер рассматривает поступление на вход кодера либо нуля, либо единицы, и, в зависимости от возможного состояния регистра сдвига, анализирует, соответственно, два возможных кодовых символа, которые кодер мог отправить в канал связи. Соответственно, на треллис-диаграмме из каждого узла решетки выходят по две ветви и количество возможных путей декодирования растет экспоненциально.



Рис. 4. Треллис-диаграмма сверточного декодера

Затем кодер сравнивает эти два возможных кодовых символа с фактически принятым кодовым символом и, высчитывая расстояние Хэмминга, определяет для каждого пути декодирования свою метрику. Если вес пути превышает значение глубины декодирования K (в данном случае $K = 4$), то такой путь в дальнейшем анализе не участвует. Следует заметить, что при низком значении глубины декодирования, наиболее вероятных путей декодирования становится больше, и эффективность исправления ошибок резко падает. Однако же, учитывая экспоненциальный рост количества возможных путей, декодирование при высоких значениях K предъявляет высокие требования к вычислительным способностям приемника [3,15].

На данной треллис-диаграмме декодера, выделенный жирным путь имеет самую лучшую метрику и является наиболее вероятным. Учитывая штриховые и сплошные участки пути, получаем информационную последовательность $U_{дек} \rightarrow \{...0101000110\}$, которая будет направлена получателю сообщения. Данная информационная последовательность полностью совпадает с той, которая была отправлена источником сообщения, а это значит, что декодирование прошло успешно и все ошибки исправлены.

Таким образом, использование в технологии C-OFDM сверточного кодирования в сочетании с применением декодера Витерби обеспечивает самую высокую помехозащищенность сигналов. Однако, если корректирующий потенциал системы сконцентрировать на символах, передающихся на частотах, более подверженных частотно-селективным замираниям, помехоустойчивость C-OFDM сигналов значительно увеличивается.

Список литературы

1. Локшин Б.А. Сравнение видов модуляции в наземном цифровом вещании // Теле-Спутник: журнал, 2001. № 3 (65).
2. Морелос-Сарагоса Р. Искусство помехоустойчивого кодирования. Методы, алгоритмы, применение / пер. с англ. В. Б. Афанасьева. М.: Техносфера, 2006. 320 с. (Мир связи). 2000 экз. ISBN 5-94836-035-0.
3. Карташевский В.Г., Мишин Д.В. Прием кодированных сигналов в каналах с памятью — Радио и связь, 2004.