УДК 621.391

ШТОМПЕЛЬ Н.А., к.т.н., доцент (УкрГУЖТ)

Мягкое декодирование алгебраических сверточных кодов на основе природных вычислений

Обоснована целесообразность мягкого декодирования алгебраических сверточных кодов для повышения достоверности передачи информации. Показано, что алгебраические сверточные коды можно представить в виде длинных двоичных блоковых кодов. Представлена целевая функция и разработаны основные принципы мягкого декодирования алгебраических сверточных кодов. Предложен метод декодирования данных кодов, который основан на формировании наиболее надежного базиса и поиске наиболее вероятного кодового слова с использованием процедур природных вычислений для каждого пробного вектора, получаемого в результате случайного смещения.

Ключевые слова: *мягкое декодирование, сверточные коды, природные вычисления, оптимизация.*

Постановка проблемы и анализ литературы

Важной задачей современных телекоммуникационных технологий является обеспечение заданной достоверности передачи информации, в частности, путем использования сверточных кодов. В [1] представлены преимущества и особенности построения алгебраических сверточных кодов. Жесткое декодирование данных кодов обеспечивает сравнительно невысокий выигрыш от кодирования [2], а, например, алгоритм Витерби имеет экспоненциальную вычислительную сложность [3]. Для повышения эффективности декодирования алгебраических сверточных кодов предлагается использовать мягкие решения и подход, предложенный в [4] для декодирования относительно коротких блоковых кодов.

Таким образом, актуальной задачей является обеспечение передачи информации с заданной достоверностью путем разработки метода мягкого декодирования алгебраических сверточных кодов с приемлемой вычислительной сложностью.

Цель статьи

Повышение эффективности декодирования алгебраических сверточных кодов для обеспечения заданной достоверности передачи информации.

Основная часть

Пусть задан несистематический (n_0, k_0, v) сверточный код над полем $GF(2)$, параметры которого полностью определяются обобщенным порождающим многочленом:

$$G(x) = \alpha_0 + \alpha_1 x + \ldots + \alpha_{r-1} x^{r-1} + \alpha_r x^r, \tag{1}$$

где $\alpha_0, \alpha_1, \ldots, \alpha_r$ – корни многочлена $G(x)$, принадлежащие полю $GF(2^m)$.

Предположим, что многочлен (1) суть порождающий многочлен (N, K, D) кода Рида-Соломона, тогда соответствующий алгебраический сверточный код будет иметь следующие параметры: длина информационного кадра $k_0 = 1$, кадр кодового слова $n_0 = m$, скорость кода $R = k_0 / n_0 = 1/m$, длина кодового ограничения $v = r \cdot k_0 = r$, информационная длина слова $k = r + 1$, кодовая длина блока $n = k \cdot m$, свободное расстояние $d_\infty \geq D$.

Процесс кодирования полубесконечной информационной последовательности в полиномиальном виде можно представить следующим образом:

$$C(x) = i(x)G(x) = C_0 + C_1 x + C_2 x^2 + \ldots, \tag{2}$$

где $i(x)$ – информационный многочлен, коэффициенты которого принадлежат полю $GF(2)$;

C_i – кодовые символы сверточного кода, $C_i \in GF(2^m)$.

Для получения двоичного кодового слова алгебраического сверточного кода необходимо осуществить отображение полученных согласно (2) кодовых символов в наборы элементов поля $GF(2)$, соответствующих кадрам кодового слова длиной n_0:

$$c(x) = (c_{0,1},...,c_{0,n_0}) + (c_{1,1},...,c_{1,n_0})x + (c_{2,0},...,c_{2,n_0})x^2 + ..., \tag{3}$$

где $c_{i,k}$ – кодовые символы, объединенные в кадры по n_0 элементов, $c_{i,k} \in GF(2)$, $k = 1, 2, ..., n_0$.

Если ограничить длину информационной последовательности, поступающей на вход сверточного кодера до значения K, то с учетом (2) получим кодовый многочлен вида:

$$C(x) = C_0 + C_1 x + C_2 x^2 + ... + C_{N-1} x^{N-1}. \tag{4}$$

При этом многочлен (4) формально можно рассматривать в виде кодового многочлена (N, K, D) кода Рида-Соломона, а соответствующее двоичное отображение данного кодового слова имеет

$$c(x) = (c_{0,1},...,c_{0,n_0}) + (c_{1,1},...,c_{1,n_0})x + ... + (c_{N-1,0},...,c_{N-1,n_0})x^{N-1}. \tag{5}$$

Предположим, что передача информации с использованием данного алгебраического сверточного кода осуществляется через канал с аддитивным белым гауссовым шумом с использованием двоичной фазовой модуляции, тогда кодовое слово (5) можно представить в полиномиальном виде соответствующим биполярным кодовым словом

$$v(x) = (v_{0,1},...,v_{0,n_0}) + (v_{1,1},...,v_{1,n_0})x + ... + (v_{N-1,0},...,v_{N-1,n_0})x^{N-1}. \tag{6}$$

где $v_{i,k}$ – биполярные кодовые символы, объединенные в кадры по n_0 элементов, $v_{i,k} \in \{1, -1\}$, $k = 1, 2, ..., n_0$.

Тогда принятая последовательность в полиномиальном виде равна

$$r(x) = (r_{0,1},...,r_{0,n_0}) + (r_{1,1},...,r_{1,n_0})x + ... + (r_{N-1,0},...,r_{N-1,n_0})x^{N-1}, \tag{7}$$

где $r_{i,k}$ – принятые символы, объединенные в кадры по n_0 элементов, $r_{i,k} \in R$, $k = 1, 2, ..., n_0$.

Следует отметить, что полиномиальному представлению алгебраических сверточных кодов на основе (1) – (7) однозначно соответствует матричное представление. В данном случае информационная, кодовая и принятая последовательности представляются в виде векторов, а обобщенный порождающий многочлен алгебраического кода соответствует обобщенной порождающей матрице [1].

Задачу мягкого декодирования по максимуму правдоподобия алгебраического сверточного кода можно представить в виде поиска биполярного кодового слова, для которого обеспечивается минимальное значение функции несоответствия корреляции:

$$E(r, v) = \sum_{i:\, r_i . v_i < 0} |r_i|, \tag{8}$$

где $|r_i|$ – «надежность» принятых символов, определяемая абсолютным значением (амплитудой) символов.

Известно, что декодирование по максимуму правдоподобия характеризуется экспоненциальной сложностью, поэтому целесообразно использовать субоптимальные методы декодирования с уменьшенной вычислительной сложностью. В [4] предложен подход к декодированию относительно коротких блоковых кодов на основе информации о надежности принятых символов и процедур природных вычислений. С учетом того, что алгебраические сверточные коды могут быть представлены как двоичное отображение кодов Рида-Соломона, т.е. фактически в виде длинных двоичных блоковых кодов, предлагается развить данный подход с использованием случайного смещения [5].

Пусть смещение представляет собой двоичную случайную величину θ, принимающую с равной вероятностью значения $\pm a$, где a – некоторое действительное число.

Тогда элементы пробного вектора под воздействием случайного смещения представим следующим образом:

$$r_i' = r_i + \theta. \tag{9}$$

Важную роль в предлагаемом методе декодирования алгебраических сверточных кодов играет наиболее надежный базис, который строится на основе информации о надежности принятых символов. Основные принципы нахождения данного базиса применительно к (9) заключаются в следующем. Элементы вектора r' упорядочиваются в соответствии с надежностью символов $|r_i|$, которые определяют перестановку π_1'. Тогда столбцы матрицы G переставляются в соответствии с перестановкой π_1' и первые K независимых столбцов находятся с помощью метода исключения Гаусса. Также может понадобиться перестановка π_2' для получения систематической формы порождающей матрицы G_s'.

Пусть обратное отображение принятой последовательности имеет вид

$$y' = (y_0', y_1', ..., y_{N-1}') = \pi_2'[\pi_1'[r]], \quad (10)$$

тогда для заданных значений $\{\pi_1', \pi_2', G_s'\}$ можно сначала применить последовательность действий как в [4], а затем определить новый наиболее надежный базис для пробного вектора r'.

Данный процесс является итеративным, на каждой итерации обрабатывается новый вектор r' и формируется новый наиболее надежный базис. Следует отметить, что потенциальное повышение эффективности декодирования зависит от величины θ. В векторе (10) можно выделить виртуальную границу между первыми K позициями, которые определяют наиболее надежный базис в соответствии с принятой последовательностью r, и остальными $N-K$ позициями, имеющими низкую надежность. Предложенный подход случайным образом осуществляет обмен позициями между этими группами элементов для того, чтобы построить новый наиболее надежный базис. Если наиболее надежный базис, построенный на основе принятой последовательности r, содержит слишком много ошибок, то использование случайного смещения обеспечивает возможность получения лучшего и наиболее надежного базиса путем исключения некоторых ошибочных позиций из данного базиса и добавления в него правильных позиций. Значение случайной величины θ определяет, как много позиций будет задействовано в данной процедуре. Например, если значение θ намного меньше энергии символа, то относительно немного позиций будет задействовано в обмене информацией между двумя группами элементов, что обеспечит ограниченное улучшение эффективности декодирования. С другой стороны, при увеличении значения θ повышается вероятность определить новый «хороший» наиболее надежный базис при достаточном числе итераций. При этом в наиболее надежный базис могут быть внесены ошибки, однако «неэффективная» безрезультатная итерация не оказывает влияния на эффективность декодирования, т.к. наиболее вероятное кодовое слово определяется по результатам всех итераций.

Таким образом, основные этапы предлагаемого метода мягкого декодирования алгебраических сверточных кодов заключаются в следующем.

Этап 1. Инициализация.

Определение максимального числа итераций $L = L_{\max}$, начальной итерации $w = 0$, принятой последовательности $q = (q_0, q_1, ..., q_{N-1})$, где $q_i = |r_i|$.

Этап 2. Упорядочивание принятой последовательности на основе информации о надежности символов.

Расположение позиций принятой последовательности по убыванию надежности элементов, что определяет перестановку π_1 при $l = 0$ и перестановку π_1' при $l > 0$.

Этап 3. Нахождение наиболее надежного базиса.

Упорядочивание столбцов порождающей матрицы G на основе π_1 при $l = 0$ или π_1' при $l > 0$. Определение наиболее надежного базиса с использованием метода исключения Гаусса. Преобразование полученной матрицы в систематическую форму G_s при $l = 0$ или G_s' при $l > 0$. Дополнительное преобразование может понадобиться для получения систематической формы матрицы, которая определяется перестановкой π_2 при $l = 0$ или π_2' при $l > 0$.

Этап 4. Поиск предполагаемого кодового слова с использованием процедур природных вычислений, которое обеспечивает минимальное значение функции (8).

Применение поисковых процедур на основе принятой последовательности r и наиболее надежного базиса, полученного на этапе 3. На данном этапе вначале осуществляется инициализация популяции, затем происходит миграция агентов популяции, а завершается поиск при удовлетворении некоторого критерия (например, достижения заданного числа итераций). Особенности реализации данного этапа представлены в [4].

Этап 5. Применение случайного смещения к элементам принятой последовательности.

Если число итераций $l \le L_{\max}$, то происходит добавление случайного смещения θ к принятой последовательности в соответствии с (9) и осуществляется переход к этапу 2.

Этап 6. Формирование оценки переданного кодового слова с помощью обратного отображения (10) и завершение процесса декодирования.

Таким образом, ключевой особенностью предложенного метода декодирования является поиск предполагаемого кодового слова путем нахождения наиболее надежного базиса для разных пробных векторов, получаемых с помощью случайного смещения, с последующим применением процедур природных вычислений.

Выводы

Алгебраические сверточные коды можно представить в виде длинных двоичных блоковых кодов. Для повышения эффективности декодирования данных кодов целесообразно использовать мягкие решения. Представлена целевая функция и разработаны основные принципы мягкого декодирования алгебраических сверточных кодов. Декодирование основано на формировании наиболее надежного базиса и поиске наиболее вероятного кодового слова с использованием процедур природных вычислений для каждого пробного вектора, получаемого в результате случайного смещения.

Литература

1. Алгебраические сверточные коды [Текст]: учеб. пособие / Н. И. Данько [и др.]. – Харьков: УкрГАЖТ, 2007. – 238 с.
2. Алгебраическое декодирование сверточных кодов [Текст] / С. И. Приходько, С. А. Гусев, А. С. Постольный, А. С. Жученко // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті: науково-технічний журнал. – Харків: УкрДАЗТ, 2005. – № 6. – С. 29 – 37.
3. Морелос-Сарагоса, Р. Искусство помехоустойчивого кодирования. Методы, алгоритмы, применение [Текст]: пер. с англ. / Р. Морелос-Сарагоса. – М.: Техносфера, 2005. – 320 с.
4. Метод декодирования линейных блоковых кодов на основе популяционных процедур поисковой оптимизации [Текст] / А. С. Жученко, Н. Г. Панченко, С. В. Панченко, Н. А. Штомпель // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті: науково-технічний журнал. – Харків: УкрДУЗТ, 2016. – Вип. 2 (117). – С. 25 – 29.
5. Jin, W. Reliability-based soft-decision decoding with multiple biases / W. Jin, M. P. C. Fossorier // IEEE Transactions on Information Theory. – 2007. – Vol. 53, № 1. – January. – P. 105 – 120.

Штомпель М. А. М’яке декодування алгебраїчних згорткових кодів на основі природних обчислень. Обгрунтована доцільність м'якого декодування алгебраїчних згорткових кодів для підвищення достовірності передачі інформації. Показано, що алгебраїчні згорткові коди можна подати у вигляді довгих двійкових блокових кодів. Наведено цільову функцію і розроблено основні принципи м'якого декодування алгебраїчних згорткових кодів. Запропоновано метод декодування даних кодів, який оснований на формуванні найбільш надійного базису і пошуку найбільш імовірного кодового слова з використанням процедур природних обчислень для кожного пробного вектора, одержуваного в результаті випадкового зсуву.

Ключові слова: м’яке декодування, згорткові коди, природні обчислення, оптимізація.

Shtompel M. Soft decoding algebraic convolutional codes based on natural computing. It has been shown that an important task of modern telecommunication technologies is obtaining given the reliability of the information transmission, in particular, through using of convolution codes. The principles of the polynomial representation of algebraic convolutional codes are given. The limitations of existing decoding methods these codes are considered. The expediency of the transition to soft-decision decoding algebraic convolutional codes for improve the reliability of information transmission is noted. It has been shown that the algebraic convolutional codes can be represented in the form of Reed-Solomon codes (binary long block codes). The objective function and basic principles of soft decoding algebraic convolutional codes are presented. It has been proposed decoding method these codes, which is based on the formation of the most reliable basis and searching the most likely codeword using natural computing procedures for each test vector obtained as a result of the random offset. It has been shown that the potential efficiency decoding algebraic convolutional codes depends on the amount of random offset. The small value of the random offset provides a limited improvement decoding performance. By increasing value of the random offset more likely to accidentally determine a new «good» most reliable basis, thereby reducing the probability of decoding error. The implementation features of the main steps of the proposed decoding method algebraic convolutional codes.

Keywords: soft decoding, convolutional codes, natural computing, optimization.

Рецензент д.т.н., профессор Приходько С.И. (УкрГУЖТ)

Поступила 28.09.2016 р.

Штомпель Микола Анатолійович, *Український державний університет залізничного транспорту, Харків, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри транспортного зв'язку. Роб. тел. – 730-10-81. E-mail: tz@kart.edu.ua.*

Shtompel Mykola Anatoliiovych, *Ukrainian state university of railway transport, Kharkiv, Candidate of sciences (technology), Associate professor (docent), Associate professor, Department of transport communication. E-mail: tz@kart.edu.ua.*