

## ПРИМЕНЕНИЕ АЛГЕБРАИЧЕСКИХ СВЕРТОЧНЫХ КОДОВ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ТУРБОКОДОВ

к.т.н. А.А. Кузнецов, С.А. Гусев, А.С. Жученко, С.И. Палажченко  
(представил д.т.н., проф. Ю.В. Стасев)

*Рассматриваются методы, реализующие обработку каскадных сверточных кодов (турбокодов). Предлагается способ построения турбокодов на основе использования алгебраически заданных сверточных кодов.*

**Постановка проблемы.** Эффективность функционирования информационно-телекоммуникационных систем зависит, в первую очередь, от энергетической эффективности применяемых методов помехоустойчивого кодирования. Перспективным направлением в развитии помехоустойчивого кодирования являются методы, реализующие параллельную обработку двух сверточных кодов [1 – 3]. В отечественной и зарубежной литературе такие методы получили название турбокодов. Основным недостатком известных методов построения турбокодов является низкая скорость кодирования:  $R < 1/2$ . Повышение скорости кодирования обычно достигается за счет процедуры выкалывания кода [4], которое приводит к снижению энергетической эффективности кодирования. Другой способ повышения скорости  $R$  состоит в выборе таких сверточных кодов, скорость которых  $R > 1/2$ . Такой выбор осуществлялся переборным методом, сложность которого растет с экспоненциальной зависимостью от длины кодового ограничения  $v$ .

Актуальным направлением является разработка и исследование алгебраических методов построения сверточных кодов, применение которых позволит осуществить построение турбокодов со скоростями  $k/n$  без процедуры выкалывания. Использование алгебраических сверточных кодов с хорошими  $(n, k, d)$  параметрами и большим  $v$  позволит также повысить энергетическую эффективность турбокодов и успешно применять их для борьбы с одиночными и групповыми ошибками.

**Анализ литературы.** Впервые турбокоды со скоростями  $1/n$  были предложены в [1 – 2]. Дальнейшее развитие получили в [3 – 4]. Алгебраические алгоритмы построения сверточных кодов с заданными конструктивными параметрами предложены в [5 – 6]. В известной авторам литературе отсутствуют способы построения турбокодов на основе алгебраических сверточных кодов.

**Применение алгебраических сверточных кодов для построения турбокодов.** Основным принципом построения турбокодов является параллельное соединение двух рекурсивных систематических сверточных кодеров (Recursive Systematic Convolutional Codes — RSC). Структурная схема турбокодера, в общем виде, представлена на рис. 1.

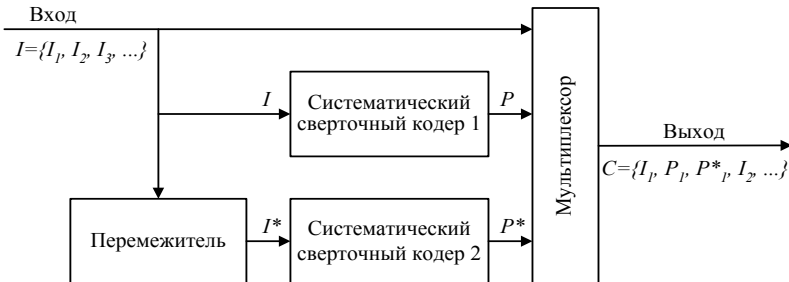


Рис. 1. Структурная схема турбокодера

Работа кодера осуществляется следующим образом. На вход подается информационная последовательность  $I = \{I_1, I_2, I_3, \dots\}$ , которая одновременно поступает на вход первого систематического сверточного кодера, на вход перемежителя и на вход мультиплексора. В перемежителе информационная последовательность перемешивается и подается на вход второго систематического сверточного кодера. Оба сверточных кодера формируют по введенной информационной последовательности проверочную часть:  $P$  и  $P^*$ , соответственно. Сформированные проверочные данные поступают на вход мультиплексора. В мультиплексоре формируется кодовое слово  $C$  путем поочередного считывания поступивших на его вход информационных и проверочных символов:  $C = \{I_1, P_1, P^*_1, I_2, P_2, P^*_2, \dots\}$ . Если скорость используемых сверточных кодов  $R_{СК} = 1/2$ , то скорость турбокода составляет  $R_{ТК} = 1/3$  (рис. 1). В общем случае, если  $R_{СК} = 1/m$ , то  $R_{ТК} = 1/(2m - 1)$ .

Анализ результатов экспериментальных исследований энергетической эффективности турбокодов показал, что структура перемежителя слабо влияет на его эффективность [1 – 4]. В тоже время она пропорционально увеличивается с ростом минимального расстояния  $d$  и длины кодового ограничения  $v$ . Отсутствие регулярных алгебраических алгоритмов построения сверточных кодов с хорошими конструктивными  $(n, k, d)$  параметрами сдерживает дальнейшее развитие методов турбокодов.

Воспользуемся алгебраическим методом построения сверточных кодов с хорошими конструктивными  $(n, k, d)$  параметрами для опреде-

ления турбокодов с заранее заданными конструктивными параметрами. Алгебраический метод построения сверточных кодов [5 – 6] оперирует развитым аппаратом циклического кодирования, что позволяет конструктивно задавать параметры сверточного кода и определять его порождающие многочлены.

Зафиксируем конечное поле  $GF(q^m)$ , некоторое множество  $H \subseteq GF(q^m)$  и  $(N, K, D)$  циклический код над  $GF(q^m)$ . Порождающий многочлен степени  $r$  циклического  $(N, K, D)$  кода над  $GF(q^m)$  полностью определяет несистематический сверточный  $(n, k, d)$  код над  $GF(q)$  с кодовым ограничением  $v = r \cdot k^0$  и параметрами [5 – 6]:

$$\begin{aligned} n &= k \cdot n^0 / k^0; \\ k &= (r + 1) \cdot k^0; \\ n^0 &= m; \\ k^0 &= \log_q |H|; \\ m &\geq k^0; \\ R &= k^0 / m; \\ d &\geq D. \end{aligned}$$

В общетеоретическом плане построенный таким образом сверточный код является обобщением блочного циклического кода в несистематическом виде до бесконечной длины и отображением его в множество  $H \subseteq GF(q^m)$ . Процесс кодирования сверточного кода состоит в последовательном умножении информационного многочлена  $I(x)$  на порождающие многочлены  $P_1(x) \dots P_m(x)$  сверточного  $(n, k, d)$  кода с поочередным считыванием полученных результатов. Коэффициенты порождающих многочленов сверточных кодов определим из выражения

$$g(x) = P(x) = (p_{1,r-1}, p_{2,r-1}, \dots, p_{m,r-1})x^r + (p_{1,r-2}, p_{2,r-2}, \dots, p_{m,r-2})x^{r-1} + \dots + (p_{1,1}, p_{2,1}, \dots, p_{m,1})x + (p_{1,0}, p_{2,0}, \dots, p_{m,0})$$

где  $g(x) = g_0 + g_1x + g_2x^2 + \dots + g_r x^r$  – порождающий многочлен  $(N, K, D)$  циклического кода над  $GF(q^m)$ .

На рис. 2 представлена схема турбокодера, построенного с использованием алгебраических сверточных кодов в несистематическом виде. Основное достоинство такого подхода состоит в использовании сверточных кодов с заранее заданными параметрами сверточных кодов.

**Выводы.** Разработан конструктивный способ построения турбокодов, отличающийся от известных применением алгебраически заданных сверточных кодов, что позволяет определять турбокоды с произвольной длиной кодового ограничения  $v$  и заранее заданными конструктивными  $(n, k, d)$  параметрами сверточных кодов.

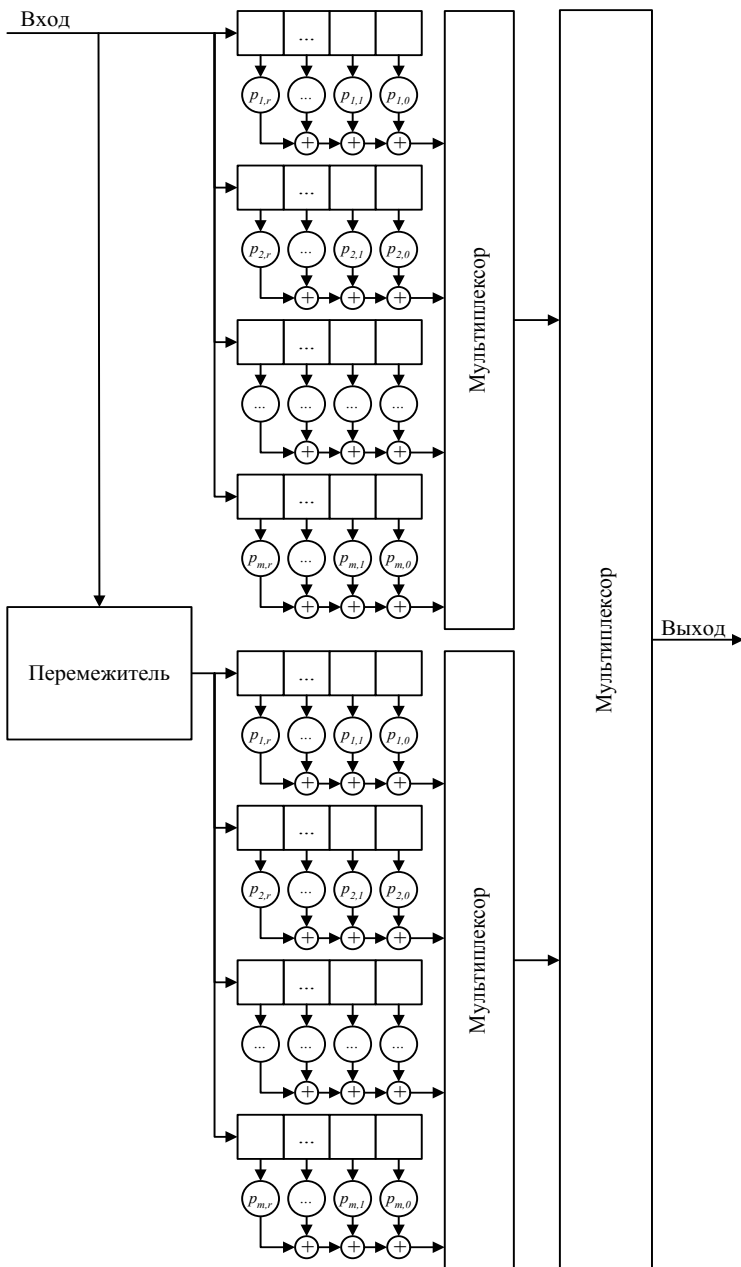


Рис. 2. Турбокодер на алгебраических сверточных кодах

С практической стороны это позволит повысить энергетическую эффективность турбокодирования за счет использования алгебраических сверточных кодов с хорошими конструктивными параметрами и большим  $v$  и успешно применять их для борьбы с одиночными и групповыми ошибками.

Одним из **направлений дальнейших исследований** является разработка и исследование алгебраических методов построения сверточных кодов только в систематическом виде, на основе которых возможно построение турбокодов со скоростями  $k/n$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. Berrou C., Glavieux A., Thitimjshima P. Near Shannon limit error correcting coding: Turbo codes // *Int. Conf. on Commun.* – Geneva, Switzerland. – May 1993. – P. 1064 – 1070.
2. Berrou C., Glavieux A. Near Optimum Error Correcing Coding and Decoding: Turbo-Codes // *IEEE Trans. On Comm.* – Vol. 44, No. 10. – October 1996.
3. Pietrobon S S., Barbulescu A.S. A simplification of the modified Bahl decoding algorithm for systematic convolucional codes // *Int. Symp. on Inform. Theory and its Applications.* – Sydney, Australia. – Nov. 1994.– P. 1073 – 1077,
4. Mark S.C., Pietrobon S.S., Giles T. Interleavers for punctured turbo codes // *IEEE Asia-Pasific Conf. on Commun.* – Singapore. – November, 1998. – Vol. 2, P. 520 – 524.
5. Краснобаев В.А., Приходько С.И., Снисаренко А.Г. Помехоустойчивое кодирование в АСУ. – Х.: ХВВКИУРВ, 1990. – 155 с.
6. Приходько С.И., Кузнецов А.А., Гусев С.А. Алгебраический метод сверточного кодирования // *Современные методы кодирования в электронных системах. Материалы международной НТК.* – Сумы: СМКЭС. – 2004. – С. 49 – 50.

Поступила 1.10.2004

**КУЗНЕЦОВ Александр Александрович**, канд. техн. наук, с.н.с., нач. научно-исследовательской лаборатории Харьковского военного университета. В 1996 году окончил Харьковский военный университет. Область научных интересов – помехоустойчивое кодирование.

**ГУСЕВ Сергей Анатольевич**, преподаватель Харьковского военного университета. В 1992 году окончил ХВВКИУРВ. Область научных интересов – помехоустойчивое кодирование в системах передачи данных.

**ЖУЧЕНКО Александр Сергеевич**, адъюнкт. В 1999 году окончил Харьковский военный университет. Область научных интересов – помехоустойчивое кодирование.

**ПАЛАЖЧЕНКО Сергей Иванович**, преподаватель Харьковского военного университета. В 1992 году окончил ХВВКИУРВ. Область научных интересов – помехоустойчивое кодирование.