

УДК 621.391

**Б.Ф. БАДАЛЯН, О.А. ГОМЦЯН, А.А. ВАРДУМЯН, А.А. БАБАДЖАНИЯН**  
**О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НЕКОТОРЫХ АЛГОРИТМОВ**  
**ПОМЕХОУСТОЙЧИВОГО КОДИРОВАНИЯ ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ**  
**СИСТЕМ ПОДВИЖНОЙ РАДИОСВЯЗИ**

Рассматриваются новые эффективные схемы помехоустойчивого кодирования для таких цифровых систем связи, как спутниковая, космическая и сотовая. Приведены характеристики рассмотренных кодовых схем при работе в канале с аддитивным белым гауссовским шумом и двоичной фазовой манипуляцией, полученные с помощью пакета MATLAB R2013a.

**Ключевые слова:** подвижная радиосвязь, помехоустойчивое кодирование, сверточные коды, каскадная схема, турбокоды, низкоплотностные коды, перемежение.

**Введение.** Одной из существенных особенностей радиоканала систем подвижной связи является нестабильность параметров и наличие замираний. При перемещении абонента на значительные расстояния возникают медленные замирания уровня принимаемого сигнала. На них накладываются быстрые замирания, вызванные многолучевым распространением сигналов. При увеличении скорости передачи и неизменной средней мощности излучаемого сигнала уменьшается энергия сигнала, приходящаяся на один бит передаваемой информации, что приводит к росту вероятности ошибочного приема. Для компенсации этих искажений применяются различные технические решения.

Важнейший вклад в повышение достоверности обмена цифровыми данными вносит теория помехоустойчивого кодирования. Применение кодирования обеспечивает заметное повышение энергетической эффективности систем, т.е. снижается величина энергии, затрачиваемой на передачу одного бита сообщения.

Поиском конкурирующих алгоритмов, которые наиболее просто и с максимальной достоверностью исправляли бы потоки ошибок в сильно зашумленных каналах, заняты многие тысячи исследователей.

На сегодняшний день среди алгоритмов для цифровых систем подвижной радиосвязи наибольшего успеха добились разработчики сверточных, каскадных и турбоподобных кодов различного назначения, низкоплотностных (Low-Density Parity-Check-LDPC) кодов и их дальнейших модификаций.

**Основная часть.** При сверточном кодировании очередная группа из  $k$  двоичных информационных символов заменяется группой из  $n$  двоичных кодовых символов, так что скорость кода оказывается равной  $R = k/n$ . Главное отличие от блоковых кодов состоит в том, что при формировании группы кодовых символов используется не только текущая группа информационных символов, но и  $K-1$  предшествующих групп, где  $K$  - конструктивная длина кода.

При декодировании сверточных кодов наибольшее распространение в системах мобильной радиосвязи получил алгоритм Витерби, когда декодер на решетчатой диаграмме выбирает тот путь, который соответствует наименьшему хэммингову расстоянию до последовательности зарегистрированных кодовых символов [1]. Данный метод является оптимальным, однако его сложность растет экспоненциально с ростом  $K$ , и поэтому на практике декодеры с  $K > 9$  не используются. В результате возникает необходимость поиска более простых, с точки зрения практической реализации, декодеров, обеспечивающих в то же время близкое к оптимальному декодирование.

Результаты моделирования наиболее распространенных кодов, проведенного нами с помощью пакета расширения Communications System Toolbox V.5.4 системы MATLAB R2013a, приведены на рис.1.

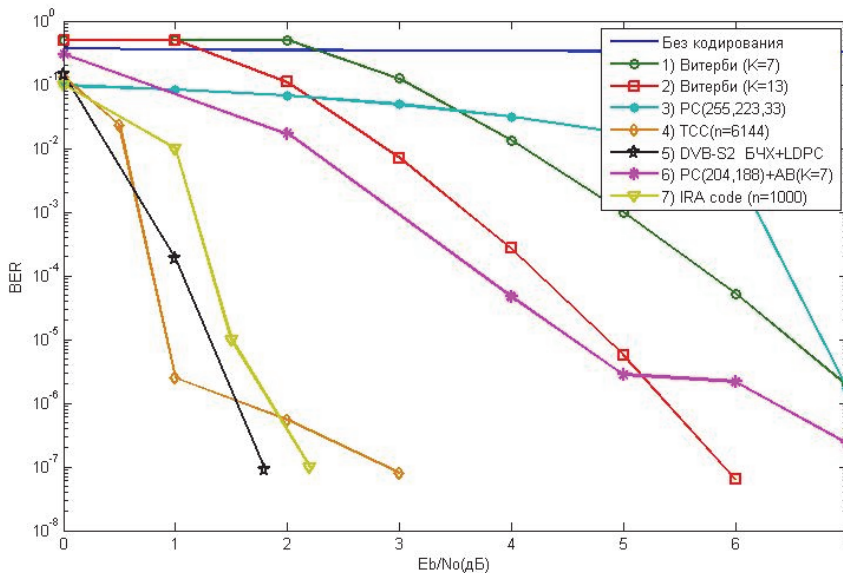


Рис. 1. Характеристики помехоустойчивых кодов

В качестве базовых на рис.1 представлены характеристики широко используемого декодера Витерби с конструктивными длинами сверточных кодов  $K=7$  (так называемый стандартный код NASA) и  $K=13$  (кривые 1 и 2), а также недвоичного кода Рида-Соломона (РС) с  $n=255$  и  $k=223$  (кривая 3). Отметим, что код называется недвоичным, так как в качестве символа здесь выступает не двоичный символ, а элемент поля Галуа. Для коротких кодов РС существуют достаточно эффективные алгоритмы декодирования, в полной мере использующие корректирующие возможности кода [2]. Однако короткие коды РС часто не могут обеспечить требуемой в настоящее время степени защиты информации от ошибок, а для длинных кодов РС практически невозможно создать эффективные декодеры.

Следует отметить, что эффективность использования РС и особенно сверточных кодов в каналах подвижной радиосвязи существенно зависит от статистики ошибочных решений в демодуляторе. Так, в каналах с глубокими замираниями уровня сигнала неизбежно пакетирование ошибок на выходе сверточного кода. Для решения данной проблемы применяют либо каскадное кодирование, либо перемежение.

Каскадные коды являются результатом комбинирования двух или более кодов. Их основное предназначение - корректировать в кодовых последовательностях наборы искажений, состоящие как из группирующихся, так и одиночных ошибок. В составе каскадной схемы кодер и декодер, находящиеся внутри цепи кодирования, называются внутренним кодеком (рис.2). Первый кодер и последний декодер в цепи каскадной схемы называются внешним кодеком, назначение которого - исправление одиночных и пакетированных ошибок. Если внешний кодек работает с кодовой скоростью  $r_1 = k_1/n_1$ , а внутренний - с  $r_2 = k_2/n_2$ , тогда с учетом того, что длина каскадного кода составляет  $N = n_1 n_2$  символов, из которых  $K = k_1 k_2$  символов являются информативными, кодовая скорость каскадного кода оказывается равной

$$R = \frac{k_1 k_2}{n_1 n_2} = r_1 r_2. \quad (1)$$



Рис. 2. Схема каскадного кодирования

Очень часто в каскадных кодирующих конструкциях кодеки блоковых РС кодов используют в качестве внешнего кодера, так как они имеют оптимальные характеристики как для одиночных, так и для пакетных ошибок [3]. Для внутреннего кодирования обычно используют сверточные коды, для декодирования которых применяется оптимальный алгоритм Витерби. Однако декодеры Витерби имеют выраженную тенденцию к размножению и пакетированию ошибок, когда вероятность их появления начинает превышать определенный предел. Поэтому в данной схеме между компонентными кодами включаются устройства перемежения и восстановления, осуществляющие перестановку символов по определенным правилам. Перемежители позволяют эффективно декоррелировать ошибки (разорвать между ними статистические связи) в канале, т.е. преобразовать пакеты ошибок большой кратности в одиночные. В случае идеального перемежения ошибки на входе декодера РС будут независимыми, и он реализует свою максимальную корректирующую способность. Характеристики часто используемого каскадного кода, состоящего из кода Рида-Соломона (204,188), сверточного кода с  $K=7$  и перемежителя, представлены на рис.1 (кривая 6).

Также на рисунке отражены характеристики турбо- и низкоплотностных кодов (кривые 4,5). Видно, что методы декодирования данных кодов обладают впечатляющей корректирующей способностью. Однако данные результаты были получены при использовании идеальных алгоритмов декодирования турбо- и LDPC кодов, которые неосуществимы при аппаратной реализации декодеров из-за различных ограничений. Применение же неидеальных, но сложнейших в реализации алгоритмов декодирования приводит к потере  $0,5...1$  дБ, что существенно снижает их корректирующую способность [4]. Сложность декодирования LDPC кодов примерно линейна с длиной кода,

однако порождающая матрица не обладает специальными свойствами (например, малой плотностью ненулевых элементов), упрощающими кодирование. При непосредственной реализации сложность кодирования может быть квадратичной функцией длины кода, и тогда она намного превысит сложность декодирования.

Наиболее важным моментом при проектировании турбокодов с параллельным каскадированием является правильный выбор компонентных кодов и перемежителя, так как от этого зависят помехоустойчивость и сложность реализации. К основным требованиям, предъявляемым к перемежителям турбокодов, относятся хорошие перемешивающие свойства, отсутствие циклов и бесконфликтность при параллельных вычислениях (декодеры не обращаются к одним и тем же ячейкам памяти одновременно).

К числу недостатков турбокодов следует отнести необходимость выполнения огромного количества итераций декодирования ( $I=5-50$ ) и наличие области насыщения вероятности ошибки, в которой скорость уменьшения вероятности ошибки при повышении отношения сигнал/шум значительно замедляется.

Коды повторения-накопления (Repeat-Accumulate – RA) появились в 1998 году как простая модель кодирования, удобная для теоретического анализа и в то же время позволяющая вплотную приблизиться к пропускной способности канала [5]. Принцип кодирования заключается в повторении информационного символа фиксированное число  $s$  раз, затем вся последовательность перемешивается и пропускается через сумматор-накопитель, который заменяет каждый элемент суммой по модулю 2 со всеми предыдущими элементами. Скорость такого кода равна

$$R = \frac{1}{s+1}. \quad (2)$$

Развитием RA кодов являются нерегулярные RA (Irregular Repeat Accumulate – IRA) коды. Введение нерегулярности в структуру RA кодов позволяет так же, как в случае LDPC кодов, существенно улучшить их эффективность. Обычно IRA коды строятся путем повторения различных информационных символов различное число раз. В этом случае код задается набором значений  $f_i$ , определяющих долю информационных бит, повторяющихся  $i$  раз.

На рис. 1 отражены характеристики IRA кодов с кодовой скоростью 1/2 (кривая 7). Видно, что эффективность IRA кодов оказывается лучше эффективности сверточных, каскадных и турбокодов. К недостаткам IRA кодов

можно отнести значительное число итераций декодирования, которое при работе вблизи пропускной способности канала может достигать нескольких сотен, что приводит к значительному времени декодирования информационных символов.

**Заключение.** Результаты исследований современных алгоритмов помехоустойчивого кодирования указывают на тот факт, что проблемы сложности реализации кодирования сохранятся и в обозримом будущем, а в связи с ростом скоростей обмена информацией требования более простой реализации декодеров будут все актуальнее. Самыми дешевыми при всех вариантах реализации окажутся те алгоритмы, которые выполняют только очень простые, однородные и быстрые операции. Наиболее полно этим требованиям удовлетворяют каскадные, турбо- и низкоплотностные коды.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Шлома А.М., Бакулин М.Г., Крейнделин В.Б., Шумов А.П.** Новые алгоритмы формирования и обработки сигналов в системах подвижной связи/ Под ред. А.М. Шломы.- М.: Горячая линия-Телеком, 2008.-344с.
2. **Морелос-Сарагоса Р.** Искусство помехоустойчивого кодирования. Методы, алгоритмы, применение. -М.:Техносфера, 2006.-320с.
3. **Мамчев Г.В.** Теория и практика наземного цифрового телевизионного вещания: Учебное пособие для вузов.-М.: Горячая линия-Телеком, 2012.-340 с.
4. **Luby M. G., Mitzenmacher M., Shokrollahi M. A., and Spielman D. A.** Improved low-density parity-check codes using irregular graphs // IEEE Trans. Inform. Theory.- Feb. 2001.-Vol. 47, no. 2.-P. 585–598.
5. **Jin H., Khandekar A., McEliece R.** Irregular repeat-accumulate codes // Proc. 2nd Int. Symp. on Turbo Codes and Related Topics (Brest, France). -2000, Sept. -P. 1–8.

**Բ.Ֆ. ԲԱԴԱԼՅԱՆ, Հ.Ա. ԳՈՄՑՅԱՆ, Ա.Հ. ՎԱՐԴՈՒՄՅԱՆ,  
Ա.Ա. ԲԱԲԱՋԱՆՅԱՆ**

**ՇԱՐԺԱԿԱՆ ՌԱԴԻՈԿԱՊԻ ՀԵՌԱՆԿԱՐԱՅԻՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐՈՒՄ  
ԱՐՄԿԱԿԱՅՈՒՆ ԿՈԴԱՎՈՐՄԱՆ ՈՐՈՇ ԱԼԳՈՐԻԹՄՆԵՐԻ ԿԻՐԱՌՄԱՆ  
ՀՆԱՐԱՎՈՐՈՒԹՅԱՆ ՄԱՍԻՆ**

Դիտարկված են աղմկակայուն կոդավորման նոր արդյունավետ սխեմաներ թվային կապի այնպիսի համակարգերի համար, ինչպիսիք են արբանյակային, տիեզերական և բջջային կապը: Ներկայացված են դիտարկված կոդային սխեմաների բնութագրերը՝ ստացված MATLAB 2013a փաթեթի միջոցով, Գառայան գումարային սպիտակ աղմուկով կապուղով և երկուական փուլային մանիպուլացման դեպքում:

**Առանցքային բառեր.** շարժական ռադիոկապ, աղմկակայուն կոդավորում, փաթեթային կոդեր, կասկադային սխեմա, տուրբոկոդեր, ցածր խտությամբ կոդեր, ինտերլիվինգ:

**B.F. BADALYAN, H.A. GOMTSYAN, A.H. VARDUMYAN,  
A.A. BABAJANYAN**

**THE FEASIBILITY OF SOME ALGORITHMS OF ERROR  
CORRECTION CODING FOR PERSPECTIVE SYSTEMS OF THE  
MOBILE RADIO COMMUNICATION**

New effective circuits of error correction coding for such digital communication systems, as satellite, space and cellular are considered. The characteristics of the observed coding schemes are resulted by the activity in the channel with an additive white Gaussian noise and the binary phase-shift keying, gained by means of packet MATLAB R2013a.

**Keywords:** mobile radio communication, error correction coding, convolutional codes, concatenated codes, turbo codes, low-density parity check codes, interleaving.