

УДК 681.32

С.С. Сорокин, доцент, канд. техн. наук,

Ю.В. Болотная

Севастопольский национальный технический университет

Студгородок, г. Севастополь, Украина, 99053

E-mail: root@sevgtu.sebastopol.ua

СТРУКТУРИРОВАННЫЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВЫЕ КОДЫ, ИСПРАВЛЯЮЩИЕ ОШИБКИ С ЗАДАННОЙ ВЕРОЯТНОСТЬЮ

Рассматриваются структурированные помехозащищенные коды, адаптируемые к состоянию канала передачи данных. Эти коды содержат в себе структурную, информационную, а в системах с обратной связью и временную избыточность, как средство обеспечения гарантированной вероятности ошибки декодирования. Новый метод построения помехозащищенных кодов позволяет обнаруживать и исправлять как независимые ошибки, так и ошибки байтового типа.

Известно, что характеристики канала связи часто изменяются во времени. Следовательно, при использовании помехоустойчивых кодов с фиксированными параметрами с ухудшением состояния канала для передачи данных вводимой избыточности может оказаться недостаточно. В [1] рассматриваются ситуации, когда возникло число ошибок, превышающее исправляющую способность декодера, в результате чего из-за ошибочных действий порождаются еще и дополнительные ошибки. Таким образом, в зависимости от состояния канала, обнаружение или исправление ошибок необходимо проводить различными кодами или, по крайней мере, кодами различной длины. Применяемые коды с исправлением ошибок должны обеспечивать в канале с произвольным характером помех заданную верхнюю границу для вероятности ошибки декодирования, причем эта граница должна устанавливаться при проектировании выбором параметров кода и алгоритма декодирования.

В работах [2,3] впервые предложены $(n,k,t) \times m$ -структурированные помехоустойчивые коды с исправлением ошибок на основе линейных (n,k,t) -кодов. В системах с обратной связью структурированные помехоустойчивые коды могут применяться в режиме обнаружения ошибок для обеспечения заданной вероятности ошибки декодирования, для чего используется процедура адаптации алгоритма декодирования к текущему состоянию канала. Процедура адаптации содержит следующие шаги.

1. Определение исходного качества канала передачи данных осуществляется перед началом работы. Для чего посылается подготовленная тестовая последовательность, декодер оценивает состояние канала по числу обнаруженных в ней ошибок и передает данные о вероятности ошибки в канале приемнику.

2. Приемник осуществляет выбор оптимальных для данного качества канала параметров алгоритма декодирования.

3. Периодически, с определенной частотой, система передачи данных повторяет пункты 1 и 2, извещая об этом приемник.

4. Если система передачи информации из-за состояния канала не может обеспечить заданную вероятность ошибки, то об этом сообщается источнику, и он принимает решение о прекращении пересылки данных по каналу.

Как следует из основных принципов декодирования структурированных кодов, описанных в [2,3], наиболее гибким и легко изменяемым параметром алгоритма декодирования является так называемый *люфт*. Структурированный код с адаптацией к состоянию канала использует люфт для обеспечения гарантированной вероятности ошибки декодирования. Минимальное значение параметра равно нулю и в этом случае алгоритм декодирования структурированного кода полностью соответствует описанному в [2]. Максимальное значение люфта определяется по формуле $\lfloor w/2 \rfloor$, где w – число вариантов базового кодового слова, используемых алгоритмом декодирования, $\lfloor x \rfloor$ – целая часть числа x .

В качестве базовых кодов при структурированном кодировании можно использовать известные короткие коды, например, код Голея (23,12,3) или код БЧХ (31,16,3). Целесообразно воспользоваться в приведенных примерах полученным в [4] базовым кодом (32,16,2-5), который исправляет до двух ошибок и обнаруживает до пяти. Этот код позволяет получить более низкую вероятность ошибки декодирования за счет обнаружения ошибок, благодаря которому большинство ошибок в версиях базовых слов кратности больше t не участвуют в процедуре взвешивания, что существенно повышает эффективность структурированного кода.

Результаты испытаний структурированных кодов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты испытаний структурированных кодов

$Luft$	Q_c	q_e	R_c	R_o
0	0,0280000	0,001800000	0,166	0,166
1	0,0017000	0,000110000	0,166	0,162
2	0,0000450	0,000002800	0,166	0,157
3	0,0000040	0,000000250	0,166	0,136
4	0,0000004	0,000000025	0,166	0,095

Здесь приняты следующие обозначения: $q_e = Q/k$ – оценка эквивалентной вероятности ошибки одного информационного символа на выходе декодера, где Q – вероятность ошибочного декодирования кодовой комбинации, k – длина информационной части базового кода; $R_c = k/n_c$ – скорость передачи кода в системе без обратной связи, где $n_c = m \cdot n$ – длина структурированного кодового слова; $R_o = R_c(1 - \frac{N_r}{N + N_r})$ – скорость передачи кода в системе с обратной связью, где N – число передаваемых слов, N_r – число повторений, реализованных при передаче N слов.

Испытания проводились на структурированных кодах $(32,16,2-5) \times 3$, где $m=3$ – число повторений базового кода. Здесь приводятся примеры, в которых вероятность искажения одного символа в канале связи $q=0,1$.

Как видно из таблицы 1, повышение значение люфта ведет к сильному уменьшению вероятности ошибки декодирования, которое оправдывает незначительное снижение скорости передачи по сравнению с аналогичными кодами в системах без обратной связи.

Сравним полученные результаты статистических испытаний с результатами аналитических расчетов для кодов БЧХ, имеющих R – скорость передачи кода сравнимую с R_c – скоростью передачи, полученной при статистических испытаниях.

Определим гипотетическое значение величины n_{Luf} при условии $R \approx R_c$. Тогда

$$n_1 = 16 / 0,162 = 99; n_2 = 16 / 0,157 = 101; n_3 = 16 / 0,136 = 118;$$

$$n_4 = 16 / 0,095 = 168.$$

Как видно из значений $n_1 - n_3$, код БЧХ (127,15) имеет скорость передачи $n=15/127=0,12$ близкую к скорости передачи рассматриваемых структурированных кодов. Таким образом, в дальнейших примерах будем использовать именно этот код БЧХ.

Вероятность ошибочного декодирования кодовой комбинации для кода БЧХ определим по формуле

$$Q_{BCH} = \sum_{i=t+1}^n C_n^i \cdot q^i \cdot (1-q)^{n-i}. \text{ Для кода БЧХ (127,15) вероятность неправильного декодирования кодового слова } Q_{BCH} = 0,000096 \approx 0,0001. \text{ Эта вероятность больше, чем } Q_c \text{ в строках 3-5 таблицы 1.}$$

Неисправляемые ошибки могут появляться в любых частях кодового слова. Нас интересуют только те ошибки, которые могут остаться после декодирования в информационной части кодового слова. Определим долю этих ошибок во всем кодовом слове.

Вероятность того, что ошибка может появиться в одном конкретном разряде структурированного и БЧХ кодового слова равны:

$$q_{32} = 1/32 = 0,0313; q_{127} = 1/127 = 0,00787.$$

Вероятности того, что один разряд будет исправлен:

$$p_{32} = 1 - 0,0313 \approx 0,97; p_{127} = 1 - 0,00787 \approx 0,99.$$

Определим P_{32} и P_{127} – вероятности того, что все информационные разряды будут исправлены:

$$P(32) = p(32)^{16} = 0,97^{16} = 0,61; P(BCH) = p(BCH)^{15} = 0,99^{15} = 0,88.$$

Вероятности событий, заключающихся в том, что хотя бы один неисправный разряд окажется в информационной части слова, равны:

$$Q(32) = 1 - P(32) = 0,39; Q(BCH) = 1 - P(BCH) = 0,12.$$

Теперь определим вероятности того, что ошибки после декодирования окажутся в информационных частях кодовых слов:

$$Q'_{c1} = Q_{c1} \cdot Q(32) = 0,0017 \cdot 0,39 = 0,00068;$$

$$Q'_{c2} = Q_{c2} \cdot Q(32) = 0,000045 \cdot 0,39 = 0,000018;$$

$$Q'_{c3} = Q_{c3} \cdot Q(32) = 0,000004 \cdot 0,39 = 0,0000016;$$

$$Q'_{c4} = Q_{c4} \cdot Q(32) = 0,0000004 \cdot 0,39 = 0,00000016;$$

$$Q'_{BCH} = Q_{BCH} \cdot Q(BCH) = 0,0001 \cdot 0,12 = 0,000012.$$

Сравнивая значения вероятностей ошибки в информационных частях кодовых слов после декодирования для кодов БЧХ и структурированных кодов, можно сделать вывод о том, что характеристики БЧХ кодов уступают предлагаемым кодам для значений люфта 3 и 4.

Результаты экспериментов подтверждают, что структурированные коды являются эффективным средством использования структурной информационной и временной избыточности для повышения достоверности передачи данных в каналах с обратной связью. Алгоритмы декодирования структурированных кодов менее трудоемки, чем алгоритмы декодирования кодов БЧХ [3]. Вероятность ошибки декодирования структурированных кодов, использующих процедуру адаптации, ниже, чем у БЧХ кодов с аналогичной избыточностью.

Для структурированных кодов справедливы следующие оценки, подтвержденные теоретическими исследованиями и статистическими испытаниями.

1. Структурированный код с адаптацией к состоянию канала обеспечивает возможность варьировать вероятность ошибки декодирования в широких пределах.

2. Запрос на повторную передачу в системе передачи данных со структурированным кодированием, использующим процедуру адаптации алгоритма декодирования к текущему состоянию канала, осуществляется в двух случаях: когда при обнаружении ошибок кратности от t_1+1 до t_2 , декодер уменьшает число вариантов для взвешивания и при этом число вариантов базового кодового слова оказывается недостаточно для декодирования кодового слова; при обнаружении того факта, что вес некоторого разряда кодового слова находится в интервале от $\lfloor w/2 \rfloor$ до $\lfloor w/2 \rfloor + Lft$, где w – число вариантов базового кодового слова, полученных алгоритмом декодирования

Полученные результаты позволяют рекомендовать структурированные коды к применению в каналах с большой вероятностью ошибки при передаче сообщений.

Библиографический список

1. Касами Т. Теория кодирования Пер. с японского / Т. Касами, Н. Токура Я. Инагака. — М.: Мир, 1978. — 576 с.
2. Сорокин С.С. Оценка вероятности ошибки декодирования кодов / С.С. Сорокин, Ю.В. Болотная // Системы автоматики и автоматическое управление: Материалы студ. науч.-техн. конф., г. Севастополь, 17-18 мая 2001 г. — Севастополь, 2001. — С. 100.
3. Сорокин С.С. Метод повышения достоверности передачи информации помехоустойчивыми кодами / С.С. Сорокин, Ю.В. Болотная // Вестн. СевГТУ. Сер. Информатика, электроника, связь: Сб. науч. тр. — Севастополь, 2002. — Вып. 41. — С. 156 – 166.
4. Сорокин С. С. Метод синтеза оптимальных линейных кодов, исправляющих и обнаруживающих ошибки в системах связи / С.С. Сорокин // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: Сб. науч. тр. 10-ой междунар. конф., г. Севастополь, 10-15 сентября 2000 г. — Севастополь, 2000. — С. 364 – 365.

Поступила в редакцию 01.03. 2005 г.