

Приходько С.И. (УкрГАЗТ),  
Зубенко В.А., Мирошниченко М.С.  
(Кировоградский национальный технический  
университет)

УДК 621.391

## МЕТОДЫ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОГО КОДИРОВАНИЯ В ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

В настоящее время известны блочные и сверточные коды. В основе вычисления кодового слова  $c$  блочного кода лежит свертка конечной, постоянной длины. При этом длина порождающего вектора  $g$  соизмерима с длиной вектора информационной последовательности  $i$ . При вычислении кодового слова  $c$  сверточного кода длина вектора информационной последовательности  $i$  много больше длины порождающего вектора  $g$ . Следовательно, линейная свертка представляется бесконечной длины.

Анализ верхних и нижних оценок (границ) вероятности ошибок данных кодов позволяет сделать вывод, что оптимальные блочные коды уступают оптимальным сверточным по своим характеристикам.

С появлением алгебраических сверточных кодов появляется возможность построения так называемых кодовых конструкций на их основе, в которых предполагается параллельное соединение нескольких алгебраических сверточных кодов. Такая кодовая конструкция может состоять из алгебраических сверточных кодов в систематическом или несистематическом виде. При этом допускается реализация процедур кодирования над полем  $GF(q)$  и  $GF(q^m)$ . Это позволяет передавать дискретные сообщения с вероятностью ошибки  $P_{ош} = 10^{-5}$  при  $E/N_0$  превышающем на 0,5 дБ минимальное граничное значение при условии фиксированной скорости.

Таким образом, разработка новых методов и алгоритмов кодирования параллельных каскадных кодовых конструкций, с учетом алгебраической структуры составляющих сверточных кодов, является перспективной научно-технической задачей. Данные кодовые конструкции предполагают мягкое и жесткое принятие решений в процедурах их декодирования.

Маврина М. А.

(Полтавский национальный технический университет  
имени Юрия Кондратюка)

УДК 621.391

## Методы контроля, диагностики и исправления ошибок данных в компьютерных устройствах коммутационно-коммуникационного узла телекоммуникационной системы в классе вычетов

В докладе рассмотрены методы контроля, диагностики и исправления однократных ошибок в классе вычетов (КВ). Результаты анализа корректирующих возможностей арифметического кода показали высокую эффективность использования непозиционных кодовых структур в КВ. В докладе приведены примеры исправления однократных ошибок данных, представленных кодом КВ.

В общем случае, для контроля, диагностики и исправления ошибок данных необходимо, чтобы кодовая структура обладала определенной корректирующей способностью. Для этого нужно ввести определенную информационную избыточность, т.е. применить метод информационного резервирования. Это в полной мере относится к непозиционным кодовым структурам (НКС) в КВ.

Для любого произвольного КВ величина избыточности  $R = M_0 / M$  однозначно определяет корректирующие возможности непозиционного помехоустойчивого кода. Корректирующие коды в КВ могут иметь любые значения минимального кодового расстояния (МКР)  $d_{\min}^{(KB)}$ . Это зависит от значения величины  $R$  избыточности. Известная теорема устанавливает связь между избыточностью  $R$  корректирующего кода, значением  $d_{\min}^{(KB)}$  МКР, и количеством  $k$  контрольных оснований КВ. Корректирующий код имеет значения  $d_{\min}^{(KB)}$  МКР в том случае, если степень  $R$  избыточности не меньше произведения любых  $d_{\min}^{(KB)} - 1$  оснований КВ. С

одной стороны имеем, что  $R \geq \prod_{i=1}^{d_{\min}^{(KB)}-1} m_{q_i}$ , а с другой

стороны –  $R = M_0 / M = \prod_{i=1}^{n+k} m_i / \prod_{i=1}^n m_i = \prod_{i=1}^k m_{n+i}$ . В

этом случае, правомерно утверждать, что  $d_{\min}^{(KB)} - 1 = k$ , или

$$d_{\min}^{(KB)} = k + 1. \quad (1)$$

В докладе предложено два подхода к решению

задачи обеспечения НКС в КВ необходимыми корректирующими свойствами.

Первый подход. Зная требования к корректирующим свойствам НКС, например, по количеству обнаруживаемых  $t_{обн.}$  или исправляемых  $t_{исп.}$  ошибок, ввести, за счет количества  $k$  или величин  $\{m_{n+k}\}$  контрольных оснований, необходимую информационную избыточность  $R$ . Данная избыточность  $R$  определяет минимальное кодовое расстояние  $d_{min}^{(KB)}$  НКС в КВ.

Тогда, в соответствии с теорией помехоустойчивого кодирования (ТПК), для упорядоченного ( $m_i < m_{i+1}$ ) КВ имеем, что

$$t_{обн.} \leq d_{min}^{(KB)} - 1, \quad (2)$$

$$t_{обн.} \leq k; \quad (3)$$

$$t_{исп.} \leq \left\lfloor \frac{d_{min}^{(KB)} - 1}{2} \right\rfloor, \quad (4)$$

$$t_{исп.} \leq \left\lfloor \frac{k}{2} \right\rfloor. \quad (5)$$

Второй подход. При заданной НКС  $A_{KB} = (a_1 \| a_2 \| \dots \| a_{i-1} \| a_i \| a_{i+1} \| \dots \| a_n \| \dots \| a_{n+k})$  (при заданном значении  $k$ ) корректирующие возможности (определяемые значением  $d_{min}^{(KB)}$ ) кода в КВ определяются в соответствии с выражениями (3) и (5). Отметим, что если упорядоченный КВ расширяется путем добавления  $k$  контрольных оснований к  $n$  информационным модулям, то МКР  $d_{min}^{(KB)}$  помехоустойчивого кода увеличивается на величину  $k$  (см. выражение (1)).

В докладе показано, что увеличить значения  $d_{min}^{(KB)}$  можно также за счет уменьшения числа  $n$  информационных оснований, т. е. за счет перехода к вычислениям с меньшей точностью. Очевидно, что между корректирующими  $R$  возможностями помехоустойчивых кодов и точностью  $W$  вычислений в КВ существует обратно пропорциональная зависимость. Одна и та же ЭВМ может выполнять арифметические и другие операции с высокой  $W$  точностью, но небольшой корректирующей способностью  $R$  или с меньшей  $W$  точностью, но с более высокой корректирующей

возможностью  $R$  по контролю, диагностики и исправлению ошибок данных, а также с более высоким быстродействием обработки данных (время выполнения основных операций в КВ обратно пропорционально числу  $n$  информационных оснований).

В докладе проведён анализ процесса возможной коррекции однократных ошибок данных в КВ при наличии минимальной информационной избыточности путём введения только одного ( $k = 1$ ) контрольного основания. В этом случае, в соответствии с ТПК в КВ, МКР равно величине  $d_{min}^{(KB)} = k + 1$ . При  $k = 1$

имеем МКР  $d_{min}^{(KB)} = 2$ , что в соответствии с общей теорией помехоустойчивого кодирования, позволит гарантированно только обнаружить любую однократную ошибку (ошибку в одном из остатков  $a_i$

( $i = \overline{1, n+1}$ ) в НКС. В общем случае процесс коррекции ошибок данных в КВ, как и в позиционной системе счисления (ПСС), состоит из трёх этапов. Первый этап – контроль данных (определение правильности или неправильности исходного числа  $A_{KB}$ ). Второй этап. Это диагностика неправильного  $\tilde{A}_{KB}$  числа (определение одного искажённого остатка  $\tilde{a}_i$  по основанию  $m_i$  КВ числа  $\tilde{A}_{KB}$ ). И, наконец,

третий этап, исправление неправильного остатка  $\tilde{a}_i$  на истинное  $a_i$  число, т.е. исправления неправильного  $\tilde{A}_{KB}$  числа (получение правильного числа  $A_{KB} = \tilde{A}_{исп.}$ ).

Степень  $R$  информационной избыточности (корректирующие способности кода) оценивается величиной МКР  $d_{min}^{(ПСС)}$ . В КВ, как отмечалось выше, значение МКР определяется соотношением  $d_{min}^{(KB)} = k + 1$ , где  $k$  – количество контрольных оснований в упорядоченном КВ.

В данной статье будем рассматривать НКС  $A_{KB} = (a_1 \| a_2 \| \dots \| a_{i-1} \| a_i \| a_{i+1} \| \dots \| a_n \| \dots \| a_{n+k})$  в КВ с минимальной ( $k = 1$ ) дополнительной информационной избыточностью. В этом случае определено, что  $d_{min}^{(KB)} = 2$ . В соответствии с общей ТПК, в ПСС при минимальном кодовом расстоянии  $d_{min}^{(ПСС)} = 2$  в кодовой структуре однозначно (достоверно) определяется однократная ошибка. В ПСС под однократной ошибкой данных понимается искажение одного бита информации типа  $0 \rightarrow 1$  или

$1 \rightarrow 0$ . Для исправления этой однократной ошибки в ПСС необходимо обеспечить условие, чтобы  $d_{\min}^{(ПСС)} = 3$ .

В КВ, в отличие от ПСС, под однократной ошибкой понимается искажение одного остатка  $a_i$  по модулю  $m_i$ . Так как остаток  $a_i$  числа  $A_{KB} = (a_1 \parallel a_2 \parallel \dots \parallel a_{i-1} \parallel a_i \parallel a_{i+1} \parallel \dots \parallel a_n \parallel a_{n+1})$  по модулю  $m_i$  содержит  $z = \{\lceil \log_2(m_i - 1) \rceil + 1\}$  – двоичных разрядов, то формально можно считать, что в КВ при,  $d_{\min}^{(KB)} = 2$  ( $k = 1$ ), в пределах одного остатка  $a_i$ , можно обнаружить пачку ошибок не более чем из  $z$  двоичных разрядов. Однако в литературе показано, что в некоторых случаях при значении  $d_{\min}^{(KB)} = 2$ , в КВ имеется возможность исправления однократных ошибок.

С учётом специфики, свойств и особенностей представления НКС в КВ возможность исправления ошибок при  $d_{\min}^{(KB)} = 2$  можно попытаться объяснить следующим образом.

1. Под однократной ошибкой в ПСС и КВ понимаются разные понятия. Это было показано выше. В связи с этим МКР  $d_{\min}^{(ПСС)}$  для ПСС и  $d_{\min}^{(KB)}$  для КВ имеет различную смысловую нагрузку и количественную оценку.

2. Существующая (в неявном виде) в НКС естественная (первичная, природная) информационная избыточность, имеющаяся в остатках  $\{a_i\}$  за счёт процедуры формирования этих остатков, положительно (с точки зрения повышения помехоустойчивости и достоверности передачи и обработки информации) начинает проявляться только при наличии искусственной (вторичной) информационной избыточности. Искусственная информационная избыточность вводится в НКС за счёт использования (дополнительно к  $n$  информационным)  $k$  контрольных оснований КВ. Отличительной особенностью КВ является существенное проявление первичной информационной избыточности только при наличии вторичной, за счет введения контрольных оснований.

3. В литературе показано, что корректирующий код в КВ с попарно простыми основаниями имеет значение МКР равное величине  $d_{\min}^{(KB)}$  только в том случае, если степень информационной избыточности не меньше произведения любых  $d_{\min}^{(KB)} - 1$  оснований заданного КВ.

Наличие и взаимодействие первичной и вторичной информационной избыточности, при проведении дополнительных процедур (использования временной избыточности) в процессе исправления ошибок, обеспечивает, в некоторых случаях, возможность исправления однократных ошибок в КВ при  $d_{\min}^{(KB)} = 2$  (при  $k = 1$ ).

Действительно, учитывая выражения (3) и (5), для упорядоченного КВ, можно сделать следующие выводы: при одном ( $k = 1$ ) контрольном  $m_{n+1}$  основании КВ НКС  $A = (a_1 \parallel a_2 \parallel \dots \parallel a_{i-1} \parallel a_i \parallel a_{i+1} \parallel \dots \parallel a_n \parallel a_{n+1})$  может иметь различное значение  $d_{\min}^{(KB)}$ . В данном

случае это зависит от величины контрольного  $m_{n+1}$  основания. Если для каждого отдельного модуля КВ выполняется условие  $m_i < m_{n+1}$  ( $i = \overline{1, n}$ ), то тогда, в соответствии с выражением (1), можно сделать вывод, что  $d_{\min}^{(KB)} = 2$ , т.е., в соответствии с выражением (2) имеем, что  $t_{обн.} = 1$ . Если для совокупности  $\{m_i\}$  информационных оснований для произвольной пары модулей выполняется условие  $m_i \cdot m_j < m_{n+1}$  ( $i, j = \overline{1, n}; i \neq j$ ), то в этом случае  $d_{\min}^{(KB)} = 3$  и  $t_{обн.} = 2$ .

В докладе также отмечается, что увеличить значения  $d_{\min}^{(KB)}$  можно также за счет уменьшения числа  $n$  информационных оснований, т.е. за счет перехода к вычислениям с меньшей точностью. Очевидно, что между корректирующими  $R$  возможностями помехоустойчивых кодов и точностью  $W$  вычислений в КВ существует обратно пропорциональная зависимость. Компьютерные устройства коммутационно-коммуникационного узла телекоммуникационной сети могут выполнять арифметические и другие операции с высокой  $W$  точностью, но небольшой корректирующей способностью  $R$  или с меньшей  $W$  точностью, но с более высокой корректирующей возможностью  $R$  по контролю, диагностики и исправлению ошибок данных, а также с более высоким быстродействием обработки данных (время выполнения основных немодульных операций в КВ обратно пропорционально числу  $n$  информационных оснований).

В докладе показано, что, в отличие от помехоустойчивых кодов в позиционных двоичных

систем счисления, арифметические коды в КВ обладают дополнительными корректирующими возможностями. Так, наличие в НКС одновременно первичной и вторичной информационной избыточности, в некоторых случаях, может обеспечить возможность исправления однократных ошибок в КВ при МКР равным  $d_{\min}^{(KB)} = 2$ . Однако, для исправления однократных ошибок требуется проведение дополнительных процедур обработки данных, т.е. применение, дополнительно к информационному еще и временного резервирования. Например, приведенные в докладе примеры конкретной реализации процедур контроля, диагностики и исправления однократных ошибок показывают практическую реализуемость рассмотренного метода исправления ошибок данных, представленных в КВ.

Янко А.С.

(Полтавский национальный технический университет  
имени Юрия Кондратюка)

УДК 681.142

### Метод сравнения двух целых чисел в классе вычетов

В компьютерной системе обработки данных (КСОД), функционирующей в классе вычетов (КВ), совокупность задач управления, как правило, содержит множество операций сравнения. В общем случае операции сравнения включают в себя: оценку степени несовпадения сравниваемых состояний системы, выделение из множества возможных состояний состояния системы доминирующем в некотором аспекте и пр. В частном случае результатом процесса сравнения в КВ является выявление факта совпадения или несовпадения значений величин сравниваемых положительных или отрицательных целых чисел. Операция сравнения чисел в КВ представляется собой сопоставление значений двух сравниваемых чисел или в процессе сравнения одновременно анализируется группа сравниваемых чисел.

В докладе рассматривается модель, метод и алгоритм и алгебраического сравнения чисел в КВ, основанного на использовании позиционного признака непозиционного кода (ППНК). Под операцией сравнения чисел будем понимать совокупность элементарных операций над сравниваемыми числами, представленными в КВ, имеющих цель установить качественные и (или) количественные оценки соотношения сравниваемых чисел. Предлагаемые в статье метод и алгоритм могут быть использованы для оценки равенства или неравенства двух сравниваемых чисел, а также при определении значения большего или меньшего из них в КВ.

Известно, что основным преимуществом непозиционной системы счисления в классе вычетов (КВ) является возможность организации процесса быстрой обработки данных, представленных в целочисленном виде. Использование КВ дает возможность создания методов и компьютерных вычислительных средств, обеспечивающих высокую производительную производительность решения определенного класса задач, в состав которых входят целочисленные арифметические операции сложения, вычитания, умножения. Это достигается за счет использования таких свойств КВ, как независимость, равноправность и малоразрядность остатков  $\{a_i\}$ , совокупность которых представляет число  $A_{кв} = (a_1 \| a_2 \| \dots \| a_{i-1} \| a_i \| a_{i+1} \| \dots \| a_n)$  по  $n$  основаниям (модулям) данного класса вычетов, путем применения табличной машины арифметики.

Необходимость реализации компьютерной системой обработки информации (КСОИ), функционирующей в КВ, широкого класса задач, содержащих наряду с непозиционными операциями (модульные целочисленные арифметические операции сложения, вычитания, умножения) и позиционные операции (например, часто встречающейся в задачах управления операция сравнения двух чисел  $A_{кв} = (a_1 \| a_2 \| \dots \| a_{i-1} \| a_i \| a_{i+1} \| \dots \| a_n)$  и  $B_{кв} = (b_1 \| b_2 \| \dots \| b_{i-1} \| b_i \| b_{i+1} \| \dots \| b_n)$ ) снижает общую эффективность использования непозиционной системы счисления. Это обусловлено значительным, по сравнению с выполнением вышеперечисленных арифметических операций, временем реализации операции сравнения двух чисел в КВ. Поэтому исследование и разработка моделей, методов и алгоритмов арифметического сравнения чисел является важной и актуальной научно-прикладной задачей создания КСОИ, функционирующей в КВ.

Известно, что в КВ существуют три группы методов сравнения чисел.

К первой группе мы отнесем методы непосредственного сравнения, основанные на преобразовании чисел  $A_{кв}$  и  $B_{кв}$  из кода КВ в позиционную двоичную систему счисления (ПСС)  $A_{псс} = \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_\rho$  и  $B_{псс} = \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_\rho$  ( $\rho$ -разрядность чисел  $A_{псс}$  и  $B_{псс}$ ) и дальнейшего их сравнения на основе использования двоичных позиционных сумматоров.

Ко второй группе методов относятся методы, основанные на принципе нулевизации. Процедура процесса нулевизации заключается в переходе из исходного числа