

Применение корректирующих кодов в преобразователях перемещений с комбинаторными шкалами

А. А. ОЖИГАНОВ, М. В. ТАРАСЮК

Национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, С.-Петербург, Россия, e-mail: ojiganov@mail.ifmo.ru

Поставлена и решена задача применения линейных циклических корректирующих кодов в преобразователях угловых и линейных перемещений с комбинаторными кодовыми шкалами. Показано, что корректирующие коды формируются только при введении избыточности по числу считывающих элементов без дополнительных кодовых дорожек.

Ключевые слова: преобразователь перемещения, считывающие элементы, комбинаторные кодовые шкалы, корректирующие коды.

The problem of application of linear cyclic error-correcting codes in angular and linear displacement transducers with combinatorial code scales is defined and solved. It is shown that the formation of error-correcting codes can only be achieved by introducing redundancy in the number of reading elements without introducing the additional code tracks.

Key words: displacement transducer, reader elements, combinatorial code scales, error-correcting codes.

Технический прогресс в науке и технике непрерывно связан с широким использованием вычислительных и управляющих машин, специфика работы которых предопределила развитие устройств ввода—вывода информации в ЭВМ. Такие устройства предназначены для преобразования информации, поступающей в виде аналоговых сигналов, в числовой эквивалент и решения обратной задачи — перевода кодов в аналоговые сигналы.

Преобразователи угловых и линейных перемещений в цифровой код — одни из основных устройств ввода информации. Существуют объекты (летательные аппараты, корабли, астрономические инструменты, станки с программным управлением и т. д.), надёжность и точность управления которыми, в первую очередь, зависят от точности и надёжности преобразователей перемещений.

В настоящее время кодирующие устройства преобразователей [1] совершенствуются и разрабатываются новые типы [2—4], что приводит к развитию и модернизации приборов в целом. Наибольшее внимание уделено повышению технологических и массо-габаритных характеристик, надёжности и качества устройств преобразования информации. Проанализированы возможности усовершенствования преобразователей перемещений при использовании классических принципов их организации. Показано, например, что увеличение информационной надёжности традиционных приборов с помощью корректирующих кодов возможно только при введении дополнительных кодовых дорожек и считывающих элементов (СЭ).

В [5] рассмотрены принципы построения различного типа комбинаторных кодовых шкал (КШ), имеющих как и рекурсивные (псевдослучайные и композиционные) одну кодовую дорожку [2—4]. Рекурсивные КШ позволяют сформировать корректирующие коды и повысить информационную надёж-

ность преобразователей на их основе только за счёт введения избыточности по числу СЭ, т. е. без дополнительных кодовых дорожек. В настоящее время известны рекурсивные КШ, позволяющие реализовать корректирующие коды и контролировать на четность считываемую информацию, а также формировать корректирующие коды Хемминга с исправлением одиночных ошибок считывания [6].

Цель настоящей работы — показать допустимость применения циклических корректирующих кодов в некоторых типах комбинаторных КШ. Выходная разрядность таких шкал может варьироваться в пределах 4—16 двоичных разрядов. Следовательно, на их основе можно построить преобразователи угловых перемещений, имеющие широкий диапазон разрешающей способности $\delta = 360^\circ/2^4 \dots 360^\circ/2^{16}$. В данном диапазоне корректирующий код должен обеспечивать исправление одиночных, двойных, тройных и четырёхкратных ошибок считывания.

Для описания структуры комбинаторных КШ используют понятия считывающего и образующего колец [5]. Считывающим кольцом называется двоичная последовательность символов, значения которых определяют позиции размещения СЭ относительно шкалы, а образующим — последовательность двоичных символов, где единичные и нулевые значения соответствуют активным и пассивным участкам маски данной шкалы. Кольца называются совместными, если кодовые комбинации, формируемые считывающими кольцами по отношению к образующим, взаимно диаметрально противоположны. Различают комбинаторные КШ, у которых последовательность единичных символов считывающих колец произвольная двоичная, периодическая либо меандровая. Комбинаторные КШ с меандровой последовательностью наиболее важны, так как просты в построении и позволяют формировать корректирующие коды без использования дополнительных кодовых дорожек.

Рассмотрим следующий подход к синтезу комбинаторных КШ с возможностью формирования корректирующих кодов. Пусть корректирующий код задан генераторной матрицей. Требуется определить структуру комбинаторной КШ в виде образующего и считывающего колец, позволяющую формировать корректирующий код с заданными параметрами $d_{\min}$, R , где $d_{\min}$ — минимальное кодовое расстояние, R — число квантов комбинаторной КШ.

Рассмотрим линейный циклический корректирующий код — множество двоичных кодовых слов (кодовых векторов) $\mathbf{B}$ с генераторным многочленом $G(x)$ и проведем разложение множества слов $\mathbf{B}$ следующим образом:

$$\mathbf{B} = \cup \mathbf{B}_i; \mathbf{B}_i \cap \mathbf{B}_j = \emptyset \text{ при } i \neq j;$$

$$\mathbf{B}_i = \{C(x): C(x) = x^k C_i(x) \bmod (x^N + 1)\}, \quad (1)$$

где $\mathbf{B}_i$, $\mathbf{B}_j$ — i -й и j -й циклоклассы корректирующего кода, соответственно; $C_i(x)$ — образующий многочлен i -го циклокласса; i, j — номера циклоклассов корректирующего кода; $C(x)$, N — кодовое слово корректирующего кода и его блоковая длина; k — произвольное целое, меньшее N .

Система множеств $\{\mathbf{B}_i\}$ представляет совокупность взаимно непересекающихся циклических групп, число которых определяет возможные информационные характеристики комбинаторной КШ. Будем рассматривать только $\mathbf{B}_i$, имеющие N элементов, связанных циклической перестановкой индексов. При данных условиях существует возможность реализации комбинаторных КШ с меандровой последовательностью единичных символов считывающих колец, позволяющих формировать кодовые комбинации соответствующего циклического корректирующего кода с числом квантов

$$R_{\max} = N \times P, \quad (2)$$

где P — число циклоклассов $\mathbf{B}_i$, имеющих N элементов в разложении (1).

Выбирая $i < P$, будем иметь множество возможных значений информационной ёмкости комбинаторной КШ, каждое из которых определяется как $R_i = iN$.

Для определения структуры образующего кольца составим матрицу $\mathbf{U}_{P, N}$, где строки — коэффициенты многочленов $C_i(x)$ в (1):

$$\mathbf{U}_{P, N} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{C}_P \end{bmatrix}.$$

Получим последовательность, соответствующую образующему кольцу комбинаторной шкалы, путем конкатенации столбцов $\mathbf{U}_{P, N}$. Рассмотрим на примере предложенный подход получения с комбинаторной КШ корректирующего кода с параметрами $N = 7$, $G(x) = x^3 + x + 1$ и $d_{\min} = 3$. Разложим множество кодовых слов корректирующих кодов в соответствии с (1):

СЭ1	СЭ2	СЭ3	СЭ4	СЭ5	СЭ6	СЭ7
0	0	0	0	1	1	0
0	0	1	1	0	1	1
0	1	1	0	1	0	1
1	1	0	1	0	1	0
1	0	1	0	1	0	1
1	0	0	1	0	1	0
0	1	0	0	1	0	1
0	1	0	0	0	1	1

Линейная развертка четырехразрядной круговой комбинаторной кодовой шкалы

$$\mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} 0001011 \\ 0010110 \\ 0101100 \\ 1011000 \\ 0110001 \\ 1100010 \\ 1000101 \end{bmatrix}; \mathbf{B}_2 = \begin{bmatrix} 0011101 \\ 0111010 \\ 1110100 \\ 1101001 \\ 1010011 \\ 0100111 \\ 1001110 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{B}_3 = \begin{bmatrix} 0000000 \end{bmatrix}; \mathbf{B}_4 = \begin{bmatrix} 1111111 \end{bmatrix}.$$

Так как число элементов в циклоклассах $\mathbf{B}_3$, $\mathbf{B}_4$ не равно семи, максимальное значение информационной ёмкости $R_{\max} = 2 \times 7 = 14$. Для определения структуры образующего кольца составим $\mathbf{U}_{2,7}$ матрицу, строками которой являются произвольные элементы $\mathbf{B}_1$, $\mathbf{B}_2$. Выберем, например,

$$\mathbf{C}_1 = \begin{bmatrix} 0001011 \\ 0011101 \end{bmatrix}; \mathbf{C}_2 = \begin{bmatrix} 0011101 \\ 0011101 \end{bmatrix}.$$

Выписывая элементы $\mathbf{U}_{2,7}$ сверху вниз и слева направо, получим искомую двоичную последовательность, формирующую структуру образующего кольца:

$$\mathbf{A}_{\text{ок}} = 00000111011011.$$

Структура соответствующего ей считывающего кольца имеет вид

$$\mathbf{A}_{\text{ск}} = 10101010101010.$$

На рисунке приведена линейная развертка четырехразрядной круговой комбинаторной КШ с образующим и считывающими кольцами, выполненными в соответствии с $\mathbf{A}_{\text{ок}}$, $\mathbf{A}_{\text{ск}}$.

Таблица 1

Семиразрядные кодовые комбинации циклического корректирующего кода

Номер углового положения комбинаторной КШ	СЭ1	СЭ2	СЭ3	СЭ4	СЭ5	СЭ6	СЭ7
0	0	0	0	1	0	1	1
1	0	0	1	1	1	0	1
2	0	0	1	0	1	1	0
3	0	1	1	1	0	1	0
4	0	1	0	1	1	0	0
5	1	1	1	0	1	0	0
6	1	0	1	1	0	0	0
7	1	1	0	1	0	0	1
8	0	1	1	0	0	0	1
9	1	0	1	0	0	1	1
10	1	1	0	0	0	1	0
11	0	1	0	0	1	1	1
12	1	0	0	0	1	0	1
13	1	0	0	1	1	1	0

В табл. 1 приведены четырнадцать различных семиразрядных кодовых комбинаций, последовательно фиксируемых считывающим узлом из четырех информационных и трёх корректирующих СЭ, при перемещении комбинаторной КШ на один квант против часовой стрелки. Такие кодовые комбинации соответствуют четырнадцати различным угловым положениям шкалы. Из табл. 1 следует, что множество полученных кодовых комбинаций представляет подмножество циклического кода (7, 4).

Из (2) следует, что P определяет максимальную информационную ёмкость комбинаторной КШ, поэтому возникает необходимость определения границ, в пределах которых находится P для практических значений параметров циклических корректирующих кодов.

Число циклокласов, имеющих взаимно различные циклические сдвиги порядка N , зависит от количества существующих двоичных многочленов $C(x)$ степени, меньшей N . При этом $N = \text{НОД}\{N; L[C(x)]; C(x) = 0 \bmod G(x), \text{ где } L[C(x)] — период циклической перестановки } C(x). \text{ Для циклических корректирующих кодов, блоковая длина которых } N — простое число, справедливо неравенство$

$$R \geq 2^m - 2, \quad (3)$$

где m — число информационных символов корректирующих кодов.

Отметим, что для простых значений N условие (3) всегда выполняется, за исключением кодовых комбинаций, состоящих из нулей и единиц, для которых период $L[00, \dots, 00] = L[11, \dots, 11] = 1$.

Результаты расчета в ЭВМ параметров комбинаторных кодовых шкал с циклическими корректирующими кодами приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Параметры комбинаторных кодовых шкал с циклическими КК

Число квантов комбинаторных КШ, R	Общее число СЭ (блоковая длина КК), N	Число информационных СЭ, m	Кодовое расстояние, $d_{\min}$
14	7	4	3
2010	15	11	3
1005	15	10	4
120	15	7	5
511	17	9	5
60	15	6	6
255	17	8	6
4095	23	12	7
65535	31	16	7
2047	23	11	8
32767	31	15	8
2047	31	11	9

Рассмотренный метод пространственного кодирования перемещений позволяет строить одноотсчётные преобразователи перемещений повышенной информационной надёжности. В свою очередь, такая надёжность обеспечивается формированием с комбинаторных КШ кодов с возможностью исправления и контроля одиночных, двойных, тройных и четырёхкратных ошибок считывания, а разрешающая способность шкал оказывается пропорциональной ряду значений $N \times P$. Типовые примеры комбинаторных КШ с $d_{\min} = 3 \dots 9$ приведены в табл. 2. Вариация параметров позволяет построить шкалу в широком диапазоне необходимых потребностей разрешающей способности преобразователя перемещения, например, углового, где $\delta = 360^\circ/2^4 \dots \delta = 360^\circ/2^{16}$. Практическое применение преобразователи перемещения на основе рассмотренных комбинаторных КШ могут найти в авиакосмической технике, системах управления, навигации, измерения траекторий, обнаружения и связи. Все представленные в табл. 2 комбинаторные КШ могут быть использованы при построении псевдорегулярных кодовых шкал, принципы построения которых приведены в [7].

Л и т е р а т у р а

1. Домрачев В. Г., Мейко Б. С. Цифровые преобразователи угла: принципы построения, теория точности, методы контроля. М.: Энергоатомиздат, 1984.
2. Ожиганов А. А. Корректирующие возможности псевдослучайных кодовых шкал // Приборостроение. 1988. Т. 31. № 7. С. 26—30.
3. Ожиганов А. А., Тарасюк М. В. Композиционные кодовые шкалы // Приборостроение, 1994. Т. 37. № 5—6. С. 26—29.
4. Ожиганов А. А., Лукьянов В. Д. Кодовые шкалы на основе рекуррентных последовательностей для преобразователей перемещений повышенной информационной надёжности // Датчики и системы. 2012. № 2. С. 13—17.
5. Шарин Ю. С., Либерман Я. Л., Анахов В. Я. Комбинаторные шкалы в системах автоматики. М.: Энергия, 1973.
6. Ожиганов А. А. Применение кодов Хемминга в цифровых преобразователях угла на основе псевдослучайных кодовых шкал // Измерительная техника. 2015. № 5. С. 28—32.
7. Ожиганов А. А., Прибыткин П. А. Псевдорегулярные кодовые шкалы для цифровых преобразователей угла // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2011. № 1(71). С. 67—72.

Дата принятия 11.03.2015 г.