УДК 681.78

В.П. Федоров, Д.А. Савин

ПОСТРОЕНИЕ ОДНОДОРОЖЕЧНОЙ КОДОВОЙ ШКАЛЫ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ С ПЗС-СЧИТЫВАТЕЛЕМ

Предложена однодорожечная кодовая шкала, считывание с которой осуществляется линейкой ПЗС-фотоприемников, ориентированной вдоль дорожки. Применение ФПЗС-линейки позволяет упростить кодирующую структуру при большом отношении диапазона измерения к разрешению преобразователя. Рекомендованы соотношения геометрических параметров кодирующей структуры, обеспечивающие надежное считывание кода положения объекта.

***Ключевые слова**: преобразователь линейных перемещений; кодовая шкала; линейка ПЗС-фотоприемников.*

Введение. Фотоэлектрические измерительные системы (ИС) занимают доминирующее положение в области точных линейных и угловых измерений. В рассматриваемых ИС используют штриховые, растровые или интерференционные периодические меры.

Измерительные преобразователи больших перемещений встречаются, в частности, в оборудовании для изготовления крупногабаритных деталей, в координатных измерительных машинах, в системах контроля параметров контурных перемещений промышленных роботов, в системах управления движением различных объектов и др.

Основным элементом измерительных преобразователей линейных перемещений (ПЛП), определяющим их наиболее важные характеристики, является кодовая шкала (КШ).

Построение кодовой шкалы определяет число кодовых дорожек (КД), а также число и размещение считывающих элементов (СЭ). Среди разных типов многодорожечных КШ для ПЛП [1] получили применение шкалы, построенные на основе позиционного двоичного кода и циклического кода Грея. Известны также шкалы [2], построенные с применением теории рекуррентных последовательностей. Такие рекурсивные кодовые шкалы (РКШ) позволяют проектировать одно- и двухдорожечные ПЛП [1], в том числе на основе фотоэлектрического метода считывания.

Критериями совершенства КШ при заданной разрешающей способности ПЛП являются такие признаки, как число наносимых границ смены рисунка кодовой маски, число дорожек, однопеременность используемого кода. Несмотря на серьезные достижения в данной области, существующие КШ удовлетворяют перечисленным требованиям не в полной мере. Так, в известных рекурсивных шкалах [2] число наносимых границ смены рисунка кодовой маски соизмеримо с количеством значений измеряемого перемещения, причем на точность измерения влияют погрешности нанесения всех штрихов.

Цель работы состоит в построении шкалы, максимально удовлетворяющей указанным требованиям, а именно в предельном уменьшении числа кодовых дорожек и числа наносимых штрихов.

Функциональные возможности современной микроэлектроники открывают новые перспективы получения измерительной информации с использованием ПЗС-фотоприемников [3, 4], выполненных по интегральной технологии и освоенных в серийном производстве. Применение ПЗС-линеек предпочтительнее, нежели матричных с точки зрения быстродействия ПЛП.

Постановка задачи. В данной работе рассматриваются принципы построения однодорожечной КШ преобразователя линейных перемещений со считывателем на основе ПЗС-линейки. Решается задача выбора геометрии шкалы, обеспечивающей простоту реализации ПЛП при большом числе дискретных уровней квантования диапазона изменения выходной величины преобразователя.

Построение КШ. Известна идея кодового кольца [5], представляющего замкнутую последовательность p символов, составленных из знаков алфавита $m\ (0, 1, \ldots, m-1)$, в n-членных

отрезках которой содержится ***p*** неповторяющихся кодовых комбинаций. Построение данного множества неповторяющихся комбинаций может быть осуществлено с помощью различных алгоритмов (например, Липпела и Эпштейна) [5].

В однодорожечной кодовой шкале каждый ***n***-членный отрезок должен идентифицировать определенную позицию; смежные позиции располагаются друг за другом в один шаг квантования. Считывание характеристик участка КШ, соответствующего одной позиции, означает считывание кадра. Основной проблемой построения рассматриваемой КШ является проблема «стыковки» кадров, относящихся к смежным позициям, при исключении неоднозначности считывания.

Данная проблема решается при использовании следующего алгоритма получения n-членных комбинаций, состоящих из знаков алфавита ***m***. Построение можно начинать с любого числа, но для удобства лучше начинать с чисел, состоящих из одинаковых знаков, например 00..00, 11..11. Эти знаки записываются в ячейки воображаемого регистра. Для получения каждого последующего кадра содержимое регистра перемещается на одну позицию, первый разряд текущего кадра отбрасывается, а освободившаяся ячейка заполняется знаком, который берется исходя из таблицы приоритетов (таблица 1). Знак, имеющий более низкий приоритет, записывается в освободившуюся ячейку в том случае, если полученная комбинация со знаком более высокого приоритета уже встречалась.

Таблица 1 – Приоритет знаков шкалы

Предыдущий знак	Приоритет по убыванию
0	m -1, m -2, …, 2, 1, 0
1	0, m -1, m -2, …, 2, 1
…	…
k	k-1, …, 1, 0, m -1, …, k+1, k
…	…
m -1	m -2, m -3, …, 2, 1, 0, m -1

Далее рассматривается конкретный случай реализации шкалы. Алфавит ***m*** символов представлен цифрами «0», «1», «2» и «3» (то есть ***m=4).*** Длина кодовых комбинаций ***n=4.*** Полное множество таких комбинаций в кольце получается тогда $4^4 = 256$. В соответствии с предлагаемой здесь модификацией алгоритма Липпела и Эпштейна для получения составляющих шкалу кодовых комбинаций используется счетчик, имеющий ***4*** ячейки. Первоначально эти ячейки заполняются комбинацией символов (***0001***); затем содержимое счетчика перемещается на одну позицию влево, а освободившаяся ячейка заполняется первым символом (***0***). Далее содержимое счетчика снова перемещается на одну позицию в выбранном направлении, а в освободившуюся ячейку записывают четвертый символ (***3***). Для очередной позиции процедура повторяется с той разницей, что в освобождающуюся ячейку записывают символ, стоящий слева от предыдущего в кольцевом ряду 012301230…. Если комбинации счетчика повторяются, то вместо данного очередного символа берется расположенный непосредственно слева от него в приведенном кольцевом ряду символ. Если же и эта комбинация встречалась, то берется следующий символ, определяемый по правилу убывания приоритета. А именно: приоритет убывает справа налево в приведенном кольцевом ряду 012301230…. Таким образом, например, вместо символа «2» берется стоящий слева символ «1», а если и эта комбинация встречалась, то символ «0».

Начальная и конечная части полученного в соответствии с данным алгоритмом упорядоченного набора чисел четверичной системы, составляющего кодовую шкалу, приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Числа в четверичной системе, упорядоченные по возрастанию номеров позиций шкалы (в скобках рядом с каждым числом приведен номер обозначаемой им позиции шкалы)

$0001_{(1)}$	$0010_{(2)}$	$0103_{(3)}$	$1032_{(4)}$
$0321_{(5)}$	$3210_{(6)}$	$2103_{(7)}$	$1031_{(8)}$
$0310_{(9)}$	$3103_{(10)}$	$1030_{(11)}$	$0303_{(12)}$
$3032_{(13}$	$0320_{(14)}$	$3203_{(15)}$	$2032_{(16)}$
$0323_{(17)}$	$3232_{(18)}$	$2321_{(19)}$	$3213_{(20)}$
$2132_{(21)}$	$1321_{(22)}$	$3212_{(23)}$	$2121_{(24)}$
$1210_{(25)}$	$2102_{(26)}$	$1021_{(27)}$	$0210_{(28)}$
$2101_{(29)}$	$1010_{(30)}$	$0102_{(31)}$	$1020_{(32)}$
$0203_{(33)}$	$2031_{(34)}$	$0313_{(35)}$	$3132_{(36)}$
$1320_{(37)}$	$3202_{(38)}$	$2021_{(39)}$	$0213_{(40)}$
$2131_{(41)}$	$1310_{(42)}$	$3102_{(43)}$	$1023_{(44)}$
$0232_{(45)}$	$2320_{(46)}$	$3201_{(47)}$	$2010_{(48)}$
$0101_{(49)}$	$1013_{(50)}$	. . .	. . .
. . .	$3100_{(103)}$	$1001_{(104)}$	$0013_{(105)}$
$0131_{(106)}$	$1313_{(107)}$	$3131_{(108)}$	$1312_{(109)}$
$3120_{(110)}$	$1202_{(111)}$	$2020_{(112)}$	. . .
. . .	. . .	$0033_{(224)}$	$0333_{(225)}$
$3332_{(226)}$	$3322_{(227)}$	$3222_{(228)}$	$2221_{(229)}$
$2211_{(230)}$	$2111_{(231)}$	$1113_{(232)}$	$1133_{(233)}$
$1333_{(234)}$	$3331_{(235)}$	$3311_{(236)}$	$3111_{(237)}$
$1112_{(238)}$	$1122_{(239)}$	$1222_{(240)}$	$2220_{(241)}$
$2200_{(242)}$	$2000_{(243)}$	$0002_{(244)}$	$0022_{(245)}$
$0222_{(246)}$	$2223_{(247)}$	$2233_{(248)}$	$2333_{(249)}$
$3330_{(250)}$	$3300_{(251)}$	$3000_{(252)}$	$0000_{(253)}$

Эта таблица, приведенная здесь не полностью, по сути и представляет собой числовое описание проектируемой шкалы. Её фрагмент, полученный при переходе от цифр к их двоичному выражению и графическому представлению битов, показан на рисунке 1. Двоичное выражение цифр четверичной системы предопределяет построение КШ из двух дорожек.

Каждая позиция на рассматриваемой двухдорожечной КШ идентифицируется кадром длиной в четыре цифровых отрезка. Разрешающая способность здесь ограничивается длиной цифрового отрезка. На рисунке 1 в кадр (охвачен рамкой) фотосчитывателя попадает позиция 109 с кодом 1312.

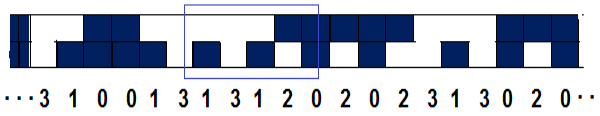

Рисунок 1 – Фрагмент двухдорожечной кодовой шкалы, соответствующий номерам позиций 103 ÷ 119 таблицы 2: рамкой ограничен кадр считываемой позиции 109

При таком построении КШ не достигается поставленная цель – предельное уменьшение числа дорожек и числа наносимых границ смены рисунка кодовой маски.

Переход к однодорожечной КШ можно осуществить, если каждую цифру кода представить на оптической кодовой дорожке соответствующим эквивалентом (клеткой); это соответствие показано на рисунке 2. Фактически цифры кодируются с помощью цифровых меток – утолщенных полос, наносимых в определенных зонах цифровой клетки.

Рисунок 2 – Представление цифр кода на оптической кодовой дорожке

Считываемый с дорожки код позиции представляется последовательностью указанных цифровых клеток (в нашем случае реализации КШ – четырех). Считывание кода положения с такой дорожки аналогично считыванию линейного штрих-кода.

Определяемое по кодовой шкале число позиций (количество значений измеряемого перемещения) при диапазоне измерения L и разрешении τ составляет

$$N_{поз} = L/\tau. \qquad (1)$$

Если разрешение τ определяется шагом цифровых клеток, то число $N_{поз}$ может быть увеличено, во-первых, увеличением длины алфавита знаков m (в частном случае – увеличением основания системы счисления), а также длины кодовых комбинаций n. При этом реализация шкалы усложнится.

Увеличить отношение диапазона измерения L к разрешению τ можно и другим путем, а именно – переходом к двухканальной схеме измерения с каналами грубого и точного отсчета.

Выходной код канала грубого отсчета – это код считываемого кадра из четырех цифровых клеток описанной выше КШ (то есть восьмиразрядный двоичный код одной из позиций КШ). Начальная клетка кадра идентифицируется по нахождению на ней опорной метки, жестко связанной с подвижной оптической системой преобразователя. Выходной код канала точного отсчета должен уточнить положение подвижной части ПЛП относительно неподвижной шкалы.

Жестко связанную с оптической системой преобразователя опорную метку можно представить в виде реперной линии, нанесенной на прикрепленную к диафрагме объектива стеклянную пластину (рисунок 3). Вторая реперная линия, показанная на рисунке, необходима как резервная в ситуации попадания изображений основной реперной линий на изображение какой-либо метки. При этом расстояние между обеими реперными линиями должно быть таким, чтобы хотя б одна из них всегда распознавалась и была идентифицирована как основная (левая) или как дополнительная (правая).

Левая реперная линия отмечает первую позицию кадра и далее считается основной.

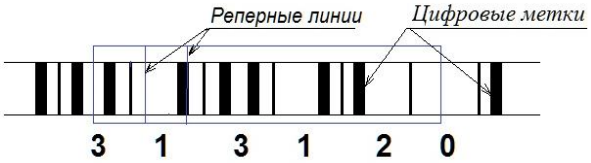

Рисунок 3 – Фрагмент кодовой шкалы, соответствующий считыванию позиции с номером 109 табл. 2: в поле зрения камеры, перемещающейся вместе с объектом относительно шкалы, находятся две реперные линии

Выходной код канала точного отсчета определяется положением основной реперной линии (рисунок 4) относительно границ цифровых клеток. Это положение находится путем вычисления отношения отрезков **a** и **b** (рисунок 4), на которые реперная линия разделяет шаг референтных меток **h** (расстояние между одноименными границами цифровой клетки). Уточнение положения объекта сводится к определению смещения **a** из уравнений:

$$a / b = \zeta; \quad a + b = h, \qquad (2)$$

то есть $$a = \frac{h\varsigma}{1+\varsigma}\ . \qquad (3)$$

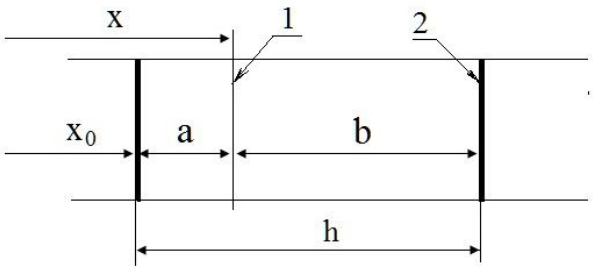

Рисунок 4 – Первая позиция кадра на однодорожечной кодовой шкале: 1 – основная реперная линия; 2 – референтная метка

В итоге значение измеряемой координаты находится при известном шаге h референтных меток в зависимости от № позиции и вычисленного отношения ζ как

$$x = x_0 + h\frac{\zeta}{1+\zeta}, \qquad (4)$$

где $x_0 = h \cdot №_{поз}$.

Толщина реперной линии в формулах (2) – (4) не учитывается и для повышения точности измерения координаты должна быть минимально возможной.

Задача формирования кода измеряемой координаты наилучшим образом решается при проецировании изображения соответствующего измеряемому положению объекта участка кодовой дорожки на матрицу (линейку) со множеством достаточно равномерно расположенных фотоприемников. Использование в качестве датчиков считываемого с кодовой шкалы изображения приборов с зарядовой связью (ПЗС) открывает именно такие возможности. Для однодорожечной КШ более подходящим прибором является ПЗС-линейка, обеспечивающая наибольшее быстродействие ПЛП. Благодаря высокой координатной стабильности светочувствительных элементов [3] ПЗС-линейка может рассматриваться как измерительная шкала.

Далее будем полагать, что в роли считывателя может выступать ориентированная вдоль дорожки линейка ПЗС-элементов.

Наличие в ПЗС-линейке множества фотоприемников позволяет увеличить разрешение ПЛП (так, при общем числе фотоприемных ячеек 2048 на отрезок изображения клетки их может приходиться не менее 400). Это позволяет сформировать восьмиразрядный код точного отсчета и получить разрешение ПЛП в 16 двоичных разрядов.

При использовании ПЗС-линейки описание графического изображения просматриваемого участка кодовой дорожки получается в виде совокупности электрических сигналов с выходов фотоприемников вместе с их порядковыми номерами в данной структуре. Благодаря этому решается такая важная проблема считывания, как определение координаты опорной (реперной) метки. Номер соответствующего этой метке фотоприемника всегда может быть строго задан и далее не меняться при постоянном расположении ПЗС-микросхемы относительно объектива. Такое положение достигается в действительности при установке указанных элементов в одном оптико-электронном модуле. Реперная линия в оптической системе в этом случае может использоваться только для начальной юстировки преобразователя.

Жесткая привязка описания изображения графического элемента кодовой дорожки к номеру фотоприемника в ПЗС-линейке упрощает и алгоритм считывания выходного кода ПЛП.

Считывание значения координаты основывается на следующих важных и принципиальных особенностях построения КШ: 1) стабильности шага референтных меток (шаг отсчитывается как расстояние между левыми границами этих меток); 2) различии в толщине референтных и «цифровых» меток.

Считывание начинается с накопления зарядов в ячейках ПЗС-линейки. Затем зарядовые пакеты один за другим транспортируются к выходному устройству и поступают на вход анализатора (микроконтроллера). Входной узел анализатора действует как дискриминатор уровня аналогового напряжения, то есть зарядовый пакет любой ячейки преобразуется либо в «1» либо в «0». Далее проводится анализ полученной последовательности битов.

На первом этапе анализа производится выявление референтных (граничных) меток и определение границ клеток КШ. В соответствии с этим устанавливаются границы зон возможного нахождения цифровых клеток. Если условиться, что сигналами изображения темных штрихов шкалы являются серии «0», то следующий этап анализа состоит в выявлении самых длинных серий нулей в отведенных им границах. На заключительном этапе вычисляется смещение опорной (реперной) метки кодирующей структуры относительно начала считываемого кадра, которым считается левая граница первой слева референтной метки.

На рисунке 5 представлен участок шкалы с обозначениями размеров её основных элементов: шага цифровых клеток h, толщины референтных и цифровых меток (соответственно b_1 и b_2), расстояний между соседними метками.

Анализ размерных связей представленной на рисунке 5 структуры показывает, что чем меньше толщина меток по отношению к шагу **h,** тем легче обеспечить надежное распознавание цифровых клеток при снижении требований к точности нанесения цифровых меток.

Точность же нанесения референтных меток (стабильность их шага **h**) должна быть возможно выше, так как определяет погрешность измерения координаты при помощи рассматриваемого ПЛП. Также влияние на точность преобразователя оказывают характеристики ФПЗС-структуры.

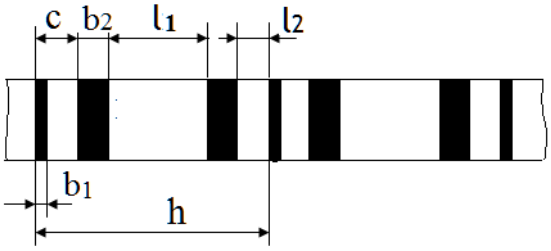

Рисунок 5 – Фрагмент кодирующей структуры с обозначением размеров

В приводимом далее примере будем считать, что соотношения размеров сохраняются при переходе от реальной шкалы к её изображению. Предположим, что при использовании считывателя с общим количеством ячеек ПЗС, равным 2048, на изображение одной цифровой клетки приходится 400 фотоприемных ячеек. Допустимые значения чисел шагов $h_я$ ячеек ПЗС, соответствующие проекциям элементов показанной на рисунке 5 кодирующей структуры, примем следующими: Пр (h) = 400±1; Пр (b_1) = 5 ÷ 8; Пр(b_2) = Пр(l_2) = 30 ÷ 40; $c = b_1 + l_2$; замыкающий размер l_1 получается тогда соответствующим Пр(l_1) = 231 ÷ 276.

Очевидно, что даже при такой низкой относительной точности выполнения размеров b_2 и l_2 свободная зона между цифровыми метками получается настолько широкой, что допускает нанесение ещё одной – центральной – цифровой метки. А это позволяет представить на оптической дорожке уже восемь цифр, то есть строить КШ в восьмеричной системе. Если при этом длину кодовых комбинаций оставить равной ***n=4*** (код позиции считывается кадром из четырех цифровых клеток), то число кодируемых позиций при этом возрастает почти на порядок. Построение КШ в соответствии с приведенным выше алгоритмом дает около 4000 позиций. Таким образом, можно увеличить разрешающую способность ПЛП до 20 двоичных разрядов (с учетом канала точного отсчета). Число наносимых границ смены рисунка кодовой маски в предлагаемой шкале получается на два порядка меньше числа различаемых позиций при снижении требований к точности нанесения части штрихов. Это делает предлагаемую КШ проще по сравнению с известными шкалами аналогичных ПЛП с теми же метрологическими характеристиками.

Выводы. Таким образом, предложен принцип построения однодорожечной кодовой шкалы преобразователя линейных перемещений со считывателем на основе ПЗС-линейки. Данное решение позволяет упростить кодирующую структуру при большом отношении диапазона измерения к разрешению преобразователя за счет уменьшения числа наносимых штрихов кодовой маски и снижения требований точности их нанесения. Предложены соотношения размеров кодирующей структуры, влияющие на точность и надежность измерения перемещений.

Библиографический список

1. *Коротаев В.В., Прокофьев А.В., Тимофеев А.Н.* Оптико-электронные преобразователи линейных и угловых перемещений. Часть 1. Оптикоэлектронные преобразователи линейных перемещений: учеб. пособие. СПб: НИУ ИТМО, 2012. 114 с.

2. *Азов А. К., Ожиганов А.А., Тарасюк М. В.* Рекурсивные кодовые шкалы // Наука и образование: Электронное научное издание. Изд. ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Н.Э.Баумана». Эл.№ ФС77- 48211. Май, 2005.

3. *Королев А.Н., Гарцуев А.И.* Точность измерения координат изображения на ПЗС-матрице// Измерительная техника. 2004. №5. С. 20 □ 22.

4. *Молодяков С.А.* Применение ПЗС-фотоприемников для предварительной обработки сигналов // Датчики и системы. 2014. №5. С. 2 – 10.

5. *Шарин Ю.С. и др.* Комбинаторные шкалы в системах автоматики. М.: Энергия, 1973. 112 с.