

## ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ПОЗИЦИОННЫХ ДАТЧИКОВ УГЛА СОВРЕМЕННЫХ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

© 2011 г. В. А. Тарков

Филиал производственного объединения “Уральский оптико-механический завод им. Э.С. Яламова”,  
“Урал-СибНИИОС”, г. Новосибирск

E-mail: vladnsk@bk.ru

Рассмотрены принципы работы оптико-электронных позиционных датчиков угла с использованием псевдослучайных бинарных кодовых последовательностей. Описаны особенности оптико-электронного двухканального позиционного датчика угла для геодезических приборов нового поколения, выпускаемых Уральским оптико-механическим заводом им. Э.С. Яламова. Тахеометр 5Та5 с разработанным оптическим позиционным датчиком угла обеспечивает измерение относительных угловых положений при среднеквадратичной погрешности не более 5 угловых секунд.

*Ключевые слова:* измерение абсолютного углового (линейного) положения, оптический позиционный датчик угла, оптический позиционный энкодер.

Коды OCIS: 120.3930, 120.0280

*Поступила в редакцию 28.10.2010*

### Введение

В геодезических приборах (нивелирах, теодолитах) для измерения углов получили распространение оптико-электронные датчики с использованием оптических лимбов. Аналогичные датчики углового и линейного положения применяются также в системах технического зрения для контроля положения и перемещения объектов в производственных и робототехнических системах.

В отличие от датчиков, используемых в системах технического зрения, которые, как правило, должны обладать высоким быстродействием, в геодезических приборах с ручным режимом отсчета к датчикам углов предъявляются менее жесткие требования по быстродействию отсчета углов при погрешности измерения относительных углов 3–5 угловых секунд. Кроме того, измерительная система должна обеспечивать работоспособность при температуре окружающей среды от –20 до +50 °С, иметь малое потребление энергии от автономной системы электрического питания прибора.

В промышленных системах и геодезических приборах для измерения угловых величин наибольшее распространение получили оптико-

электронные инкрементные датчики с использованием оптических лимбов [1]. Позиционные датчики, т. е. датчики для определения абсолютного положения объектов, имеют значительные преимущества перед инкрементными датчиками, в которых могут накапливаться ошибки определения положения объектов.

Однако широко известные датчики абсолютного положения, считывание кода в которых осуществляется параллельно с ряда информационных дорожек (поперечный метод кодирования), получили ограниченное распространение из-за необходимости увеличения разрядности кода при наращивании количества позиционных положений.

В последние 15–20 лет для определения углового и линейного позиционного положения все чаще применяются позиционные датчики (энкодеры) с использованием псевдослучайных бинарных последовательностей (pseudo-random binary sequence – PRBS). Примером этого могут служить позиционные датчики, используемые в составе геодезических приборов ведущих фирм-производителей: Sokkia, Trimble, Leica, Nicon, Topcon. Ознакомиться с характеристиками продукции этих фирм можно на их официальных сайтах.

## Принципы построения позиционных датчиков с использованием псевдослучайных бинарных последовательностей

В позиционных датчиках с поперечным методом кодирования считывание разрядов кода, расположенных на  $n$  информационных дорожках, производится параллельно. Каждому шагу пространственной дискретизации  $q$  при этом соответствует свой неповторяющийся код (как правило, используется код Грея). Для примера на рис. 1 приведен способ определения позиционного положения при параллельном считывании 5-разрядного позиционного кода. Окно  $W$  позволяет считать код (00111),

соответствующий позиционному положению  $P = 7$ .

Позиционные датчики с использованием последовательности PRBS содержат двоичную последовательность, элементы которой кодируются одним символом на шаг пространственного квантования. Этот метод кодирования является хорошим решением при создании систем измерения абсолютного положения с высоким разрешением: датчики положения вала, линейные датчики положения, навигационные датчики.

На рис. 2 схематически показан принцип определения позиционного положения при использовании PRBS последовательности. Окно  $W$  в данном примере обеспечивает возможность считывания 5-разрядного кода, который одно-

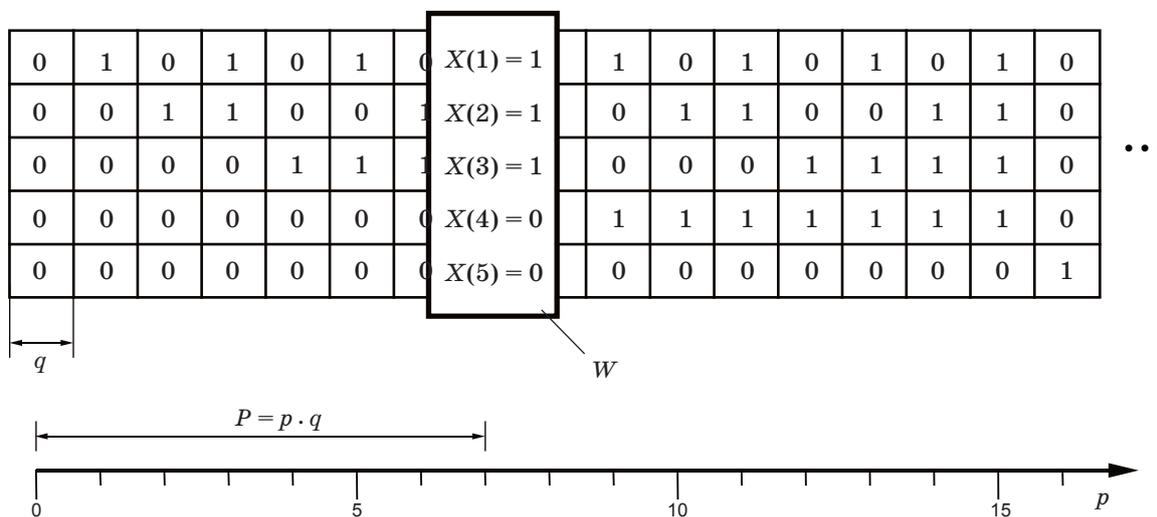


Рис. 1. Способ определения позиционного положения  $P$  при поперечном кодировании.

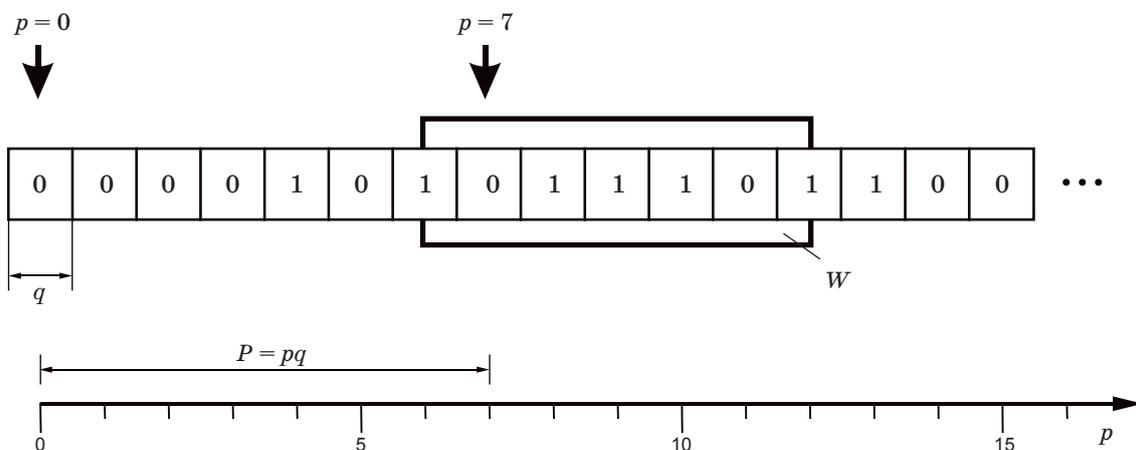


Рис. 2. Способ определения позиционного положения  $P$  при использовании последовательности PRBS.

значно определяет позиционное положение. Код (01110) в этом случае также соответствует позиционному положению  $P = 7$ . Положение младшего разряда (справа или слева) в этом случае значения не имеет, так как это учитывается при декодировании позиционного положения по таблице соответствия код – позиционное положение.

Логические последовательности “0” и “1” при этом могут представляться различными символами или функциями пропуска/отражения оптической шкалы или лимба или иным способом. В оптических датчиках для упрощения реализации шкалы и лимбы, как правило, имеют бинарную функцию пропуска.

Формирование кодовой последовательности, обеспечивающей неповторимость  $n$ -разрядных кодов, может осуществляться различными способами. Например, широко известные циклические коды [2], формирование которых можно осуществить с помощью  $n$ -разрядного сдвигового регистра с обратной связью по модулю 2 или программно, обладают необходимыми свойствами. Коды разрядности  $n$  при этом, как отмечено выше, не повторяются на протяжении всей последовательности и позволяют однозначно определить позиционное положение окна  $W$ , в пределах которого осуществляется считывание текущего кода.

В работе [3] приведен пример реализации оптически управляемого транспортного средства с контролем абсолютного положения методом, использующим PRBS и циклические коды для формирования кодовой последовательности. На рис. 2 для примера приведен фрагмент последовательности с 5-разрядными кодами, которые не повторяются в пределах всей последовательности. Генерация последовательности (0000101011101100011111001101001) осуществляется 5-разрядным сдвиговым регистром, имеющим уравнение обратной связи по модулю 2 в виде  $R(0) = R(5) + R(2)$  при начальном коде 00001. Кодирование “1” и “0” в данном примере осуществляется различными символами вида E и H, считывание и опознавание которых осуществляется с помощью системы технического зрения робота.

Для данного типа позиционных датчиков при разрядности кода  $n$  максимальное количество определяемых позиционных положений равно  $2^n - n$ . В данном примере реализации позиционного датчика линейного положения при разрядности кода  $n = 5$  количество элементов последовательности составляет 31, а количе-

ство определяемых позиционных положений равно 27.

### Высокоразрешающие оптико-электронные позиционные датчики с использованием PRBS

Описанный выше принцип непосредственного декодирования положения объекта обеспечивает возможность изготовления многопозиционных датчиков, однако точность отсчета, которая определяется половиной шага пространственной дискретизации, т. е.  $q/2$  может быть недостаточной. Так, при использовании 16-битного кода количество позиций достигает значения 65 520. Для датчика углового положения с таким количеством позиций, работающего в пределах  $360^\circ$ , точность определения углового положения, соответствующая половине шага дискретизации, составит около  $10''$ , что при рабочем диаметре кодовой дорожки лимба, равном 100 мм, соответствует шагу пространственной дискретизации, равному 4,8 мкм. Фактически такой шаг дискретизации близок к предельно возможному значению и дальнейшее увеличение точности определения позиционного положения до 1 мкм и лучше может быть получено путем уточнения положения при прямом декодировании PRBS за счет использования дополнительной инкрементной дорожки датчика. В комбинированном высокоразрешающем позиционном датчике, разработанном в Институте Пауля Шерера (Цюрих, Швейцария) [4–5], для этой цели по аналогии с инкрементными датчиками с использованием алгоритмов интерполяции фазы для повышения точности измерения перемещений, наряду с дорожкой, содержащей 18-битовую PRBS, оптическая шкала содержит дополнительную дорожку с равномерно распределенными штрихами. Период и фаза расположения инкрементной дорожки сопряжены с шагом пространственной дискретизации и фазой расположения кодовой последовательности. Для однозначной идентификации абсолютная кодовая дорожка обеспечивает разрешение в один период инкрементной дорожки, которая выбрана равной 20 мкм.

Грубый дискретный отсчет позиционного положения осуществляется по дорожке с кодовой последовательностью, а уточнение положения осуществляется за счет использования фазового фурье-детектора, определяющего фазовый сдвиг кодовой дорожки в пределах

шага дискретизации по второй дорожке. Для считывания информации при этом используется специализированное фотоприемное устройство в виде чипа, позволяющее считывать информацию с обеих дорожек, причем фотоприемное устройство позволяет непосредственно в аналоговом виде определять синусные и косинусные фурье-компоненты спектра сигнала, по которым фаза положения определяется обычным образом

$$\varphi = \arctg(U_{\sin}/U_{\cos}).$$

Конфигурация позиционного датчика с фазовым Фурье-детектором [4] схематически показана на рис. 3. Для считывания фрагмента PRBS фотоприемное устройство имеет равномерно расположенные фотоприемные элементы, а для формирования синусных и косинусных компонентов сигнала инкрементного датчика соответствующие фотоприемные зоны имеют разделительные границы в виде отрезков синусной и косинусной функции. Перенос изображения кодовых дорожек на поверхность фотоприемного устройства с увеличением, равным 4, осуществляется с помощью однолинзового телецентрического объектива с низкой числовой апертурой при формировании освещения с помощью светодиода. Позиционный датчик обеспечивает ошибку определения позиционного положения менее 100 нм на длине 1 м и может использоваться также и при изготовлении позиционных датчиков угла. В работе [5] приведен улучшенный вариант фазового детектора, в котором изменена топология фотоприемных областей для определения синусных и косинусных фурье-компонент.

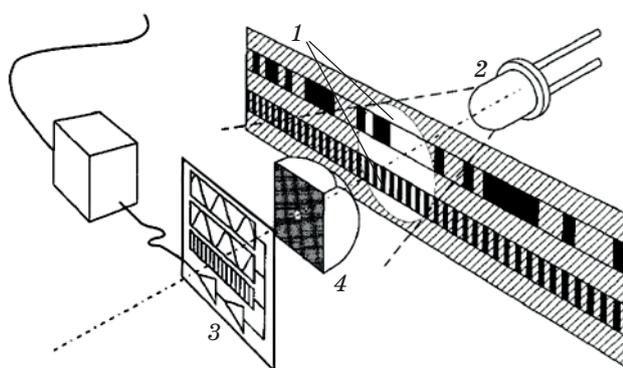


Рис. 3. Конфигурация комбинированного позиционного датчика с использованием фурье-детектора фазы. 1 – кодовые дорожки, 2 – светодиод, 3 – фотоприемное устройство, 4 – однолинзовый телецентрический объектив.

Как отмечено выше, в описанном позиционном датчике применено специализированное фотоприемное устройство, выполненное на одном чипе. Ведущие производители геодезического оборудования также используют позиционные датчики угла с использованием PRBS с фотоприемниками широкого применения. Существенное отличие от представленного выше позиционного датчика состоит в том, что для определения фазы в пределах шага пространственной дискретизации не используется дополнительная дорожка. Фаза положения фрагмента PRBS определяется непосредственно по сигналу, полученному при считывании изображения фрагмента последовательности, нанесенной в закодированном виде на оптический лимб. Считывание изображения может осуществляться с помощью линейных многоэлементных фотоприемных устройств широкого применения, выполненных по различным технологиям.

На рис. 4 в качестве примера приведена оптическая схема позиционного датчика на основе линейного фотоприемного устройства, работающего на пропускание. Оптическая схема содержит точечный источник света на основе светодиода, оптический лимб, содержащий PRBS, элементы которой закодированы в виде различных функций пропускания для логических “0” и “1” и многоэлементное фотоприемное устройство. Датчик обладает минимумом элементов и не содержит объектива. Поскольку теневое дифракционное изображение фрагмента кодовой дорожки лимба на поверхности фотоприемника имеет увеличенный масштаб  $k = 1 + z_2/z_1$  [6], сопряжение периода изобра-

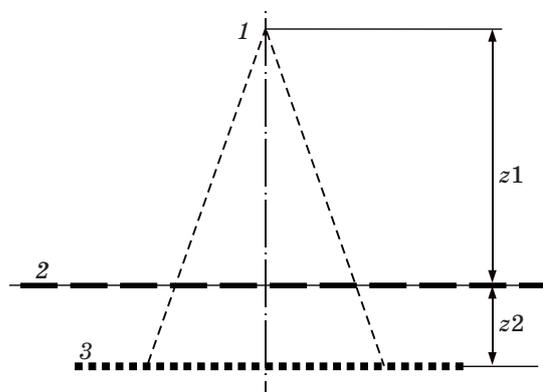


Рис. 4. Оптическая схема позиционного датчика на основе линейного фотоприемного устройства. 1 – источник света, 2 – кодовая дорожка с PRBS, 3 – элементы фотоприемного устройства.

жения кодовой последовательности с периодом фотоприемных элементов необходимо обеспечивать с учетом этого фактора. Сигнал с фотоприемной линейки обрабатывается с целью декодирования позиционного положения, погрешность определения позиционного положения может достигать половины периода дискретизации кодовой дорожки лимба. Дальнейшее уточнение положения может осуществляться путем определения фазы сигнала, считываемого с фотоприемного устройства.

Выпускаемые серийно тахеометры с таким типом позиционного датчика угла обеспечивают среднеквадратичную погрешность определения углов при геодезических измерениях 3–5". Подобного рода датчики с успехом могут использоваться для контроля углового положения в промышленных системах. В работе [7] представлены позиционные датчики углового и линейного положения, которые работают на отражение с использованием матричного фотоприемного устройства для считывания изображения кодовой последовательности.

### **Высокоразрешающий позиционный датчик угла с использованием PRBS для тахеометров ПО “УОМЗ”**

#### *Основные характеристики компонентов позиционного датчика*

Двухканальный оптико-электронный позиционный датчик угла с использованием PRBS разработан для использования в составе тахеометров. Оптическая схема датчика подобна схеме, приведенной на рис. 4. В качестве точечного источника света 1 использован светодиод с длиной волны излучения 0,65 мкм. Оптический лимб имеет рабочий диаметр кодовой дорожки 86 мм. В качестве фотоприемного устройства 3 использована ПЗС-линейка с шагом фоточувствительных элементов 14 мкм фирмы NEC. Шаг пространственной дискретизации, т. е. размеру элемента (бита) PRBS при считывании информации с лимба, соответствует 8 элементов фотоприемного устройства с учетом увеличения изображения. Таким образом, частота пространственной дискретизации при считывании изображения фотоприемным устройством в  $K = 8$  раз больше пространственной несущей частоты изображения кодовой дорожки. Это позволяет успешно осуществлять декодирование позиционного положения и уточнять его положение за счет определения фазы считываемого

сигнала. Сигналы с фотоприемных линеек двухканального датчика поступают на мультиплексор аналого-цифрового преобразователя, в качестве которого использован CCD-процессор фирмы Analog Devices. Обработка сигнала осуществляется в цифровом виде с помощью микроконтроллера фирмы Texas Instruments серии MSP430.

#### *Принцип формирования кодов с использованием PRBS*

PRBS датчика содержит 3600 элементов, что обеспечивает формирование такого же количества неповторимых “случайных” кодов размерности  $n = 12$ . Последовательность укорочена по сравнению с максимально возможным количеством равным  $2^{12}$ . Для обеспечения неповторимости кодов при переходе через 3600-й элемент обеспечивается их “сшивка”.

В отличие от формирования циклических кодов, формирование последовательности осуществляется по псевдослучайному закону от начального кода  $C_0$ . Поясним принцип формирования PRBS для формирования кодов разрядности  $n$  в предположении, что мы наращиваем последовательность в сторону старших разрядов. Очевидно, что основой для формирования младших разрядов следующего кода  $C_{i+1}$  является  $n - 1$  старших разрядов кода  $C_i$ , что соответствует значению  $C_i \% 2$ , где  $\%$  – означает деление нацело, с присвоением 0 или 1 старшему разряду кода  $C_{i+1}$ . При формировании PRBS этот выбор изначально может быть случаен до тех пор, пока не потребуются обеспечивать неповторимость формируемого кода, когда выбор значения старшего разряда становится однозначным. В десятичной форме условие формирования последовательности можно записать в виде

$$C_{i+1} = C_i \% 2 + M[C_i \% 2]2^{n-1},$$

где  $i = 1 \dots L$ ,  $M[k]$  – одномерный массив размерности не менее  $(L - n)$  с элементами, равными 0 или 1. Изначальный набор значений элементов массива  $M[k]$ , как отмечалось выше, может быть совершенно случаен. После использования при формировании кодов текущего элемента массива его значение необходимо изменить с 0 на 1 или, наоборот, для обеспечения неповторимости формируемых кодов. Генерация последовательности осуществлялась программно. “Сшивки” последовательности осуществляется за счет нарушения условия

неповторимости кода при формировании конечных элементов последовательности.

### *Кодирование логических “0” и “1” на оптическом лимбе*

Кодирование логических “0” и “1” на лимбе осуществляется за счет использования различных функций пропускания в пределах шага пространственной дискретизации (размера бита). Функции пропускания “0” и “1” в данном случае являются инверсными по отношению друг к другу, половина информационного бита при этом пропускает световое излучение, т. е. перепад пропускания для “0” и для “1” находится в центре информационного бита. Такой способ представления логических “0” и “1” на лимбе позиционного датчика аналогичен использовавшемуся фирмой Trimble. На рис. 5 приведен фрагмент использованной топологии оптического лимба с PRBS в разработанном позиционном датчике. В результате при данном способе кодирования последовательности кодовая дорожка содержит штрихи одинарной и двойной ширины. Производство оптических лимбов осуществлялось по технологии изготовления фотошаблонов ПО “УОМЗ” [8].

### *Алгоритм определения позиционного кода и фазы*

Декодирование позиционного положения в разработанном датчике обеспечивает непосредственное определение 3600 позиций с шагом угловой дискретизации  $0,1^\circ = 360''$ . Уточнение позиционного положения осуществляется за счет двухступенчатого алгоритма определения фазы сигнала. Первая ступень отсчета фазы определяет дискретное позиционное положение, соответствующее периоду расположения (размеру) фотоприемных элементов. В данном случае этот период дискретизации соответствует  $45''$  в определении углового позиционного положения. Восстановление позиционного кода и определение дискретной фазы осуществляется с использованием единого алгоритма. Вторая ступень обработки обеспечивает дальнейшее уточнение фазы сигнала.

Для анализа изображения фрагмента последовательности с целью определения текущего кода с произвольным фазовым сдвигом относительно фотоприемных элементов требуется область данных, соответствующая не менее 13 битов

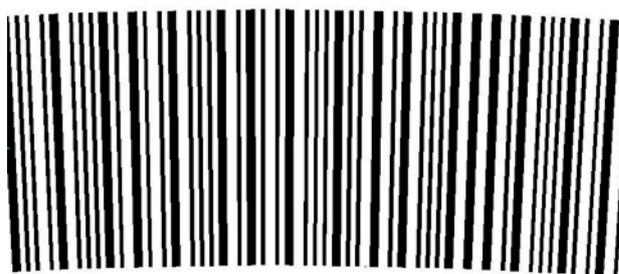


Рис. 5. Изображение фрагмента топологии оптического лимба с PRBS.

последовательности, или 104 отсчетам сигнала с фотоприемных элементов.

Предположим, что для анализа данных используется область сигнала  $U_i$ , содержащая  $L$  информационных битов ( $L > 13$ ) или  $LK$  отсчетов сигнала, т. е.  $i = 0 \dots (LK)$ . Введем значение возможных дискретных фазовых сдвигов сигнала информационных битов  $SH$ , которое находится в пределах  $0 \dots (K - 1)$ . То есть сдвиг на единицу соответствует сдвигу сигнала на размер фотоприемного элемента или на  $45''$  в определении углового положения. Для декодирования положения перепадов сигнала, соответствующего центру информационных битов логических “0” и “1” последовательности, используем свертку отсчетов сигнала с маской вида  $MR = (1 \ 1 \ 1 \ 1 \ -1 \ -1 \ -1 \ -1)$  из  $K$  значений ( $K = 8$ ). Для определения дискретного фазового сдвига вычислим локальные суммы вида

$$S_{l, SH} = \frac{1}{K} \sum_{m=0}^{K-1} (U_{Km+SH+m} MR_m),$$

где  $l = 0 \dots (L - 1)$ ,  $SH = 0 \dots (K - 1)$ .

Далее определим дискретный фазовый сдвиг  $SH = SH_0$  положения информационных битов, кратный  $45''$ , который соответствует максимальному значению по  $SH$  сумм  $S_{SH}$ , определяемых из выражения

$$S_{SH} = \sum_{l=0}^{L-1} |S_{l, SH}|.$$

Такой прием определения положения перепада сигнала позволяет детектировать как положительные, так и отрицательные перепады одновременно.

Вычисленные выше частичные суммы  $S_{l, SH}$  при  $SH = SH_0$  позволяют определить текущий фрагмент кодовой последовательности, в пределах которой находится текущий 12-битный

код, определяющий текущее позиционное положение с точностью до половины шага пространственной дискретизации (в данном случае  $0,1^\circ$ ). В этом случае компоненты текущего фрагмента кодовой последовательности  $KOD_i$ , т. е. логические “0” и “1” легко определяются при использовании нулевого порога, т. е. по различию знаков компонентов

$$KOD_i = 1, \text{ если } S_{i, SH0} > 0$$

$$\text{и } KOD_i = 0, \text{ если } S_{i, SH0} < 0.$$

На рис. 6 представлен пример отсчетов исходного сигнала  $U_i$  и вид  $S_{i, SH0}$  для декодирования фрагмента PRBS путем обработки с нулевой величиной порога. После определения 12-битного текущего кода угловое положение оптического лимба определяется из таблицы соответствия угол/код, занесенной в память используемого в датчике микроконтроллера.

Для приведенной конфигурации позиционного датчика дискретное определение фазы, как отмечено выше, обеспечивает определение позиционного углового положения дискретно через  $45''$ , т. е. точность определения положения составляет не хуже  $22,5''$ .

Для дальнейшего повышения точности позиционного датчика разработан специальный алгоритм уточнения фазы сигнала. Экспериментальное исследование образцов позиционных датчиков показало, что использование разработанных алгоритмов обработки сигнала позволяет определить позиционное положение информационных битов на лимбе с точностью  $200\text{--}300$  нм, что соответствует погрешности определения позиционного углового положе-

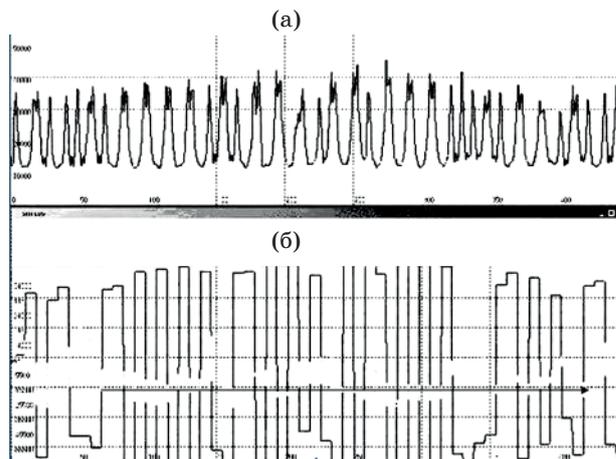


Рис. 6. Вид сигнала от фрагмента изображения оптического лимба (а) и зависимость  $S_{i, SH0}$  для декодирования фрагмента PRBS (б).

ния не более  $1\text{--}1,5''$  и относительных угловых положений не более  $3''$ .

## Заключение

Двухканальный оптико-электронный позиционный датчик угла с использованием PRBS, разработанный для применения в составе тахеометра 5Та5 ПО “УОМЗ им. Э.С. Яламова” с учетом всех погрешностей исполнения оптико-механических узлов, обеспечивает среднеквадратичную погрешность определения относительных угловых положений не более чем 5 угловых секунд. Результаты, полученные в ходе разработки позиционного датчика, будут использованы при создании ряда новых изделий ПО “УОМЗ им. Э.С. Яламова”.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Аникст Д.А., Константинович К.М., Меськин И.В. и др. Высокоточные угловые измерения / Под ред. Якушеникова Ю.Г. М.: Машиностроение. 1987. 480 с.
2. Тугевич В.Н. Телемеханика. М.: Высшая школа. 1985. 423 с.
3. Petriu E.M. Absolute Position Measurement using Pseudo-Random Binary Encoding // IEEE Instrumentation & Measurement Magazine. 1998. September. P. 19–23.
4. Kai Engelhardt and Peter Seitz. Absolute, high-resolution optical position encoder // Appl. Opt. 1996. V. 35. № 1. P. 201–208.
5. Kai Engelhardt, Peter Seitz. High-resolution optical position encoder with large mounting tolerances // Appl. Opt. 1997. V. 36. № 13. P. 2912–2916.
6. Takeshi Ito, Hino-shi. Optical encoder and output adjustment for the same // Патент США № US 2004/0155178 A1. Aug. 12. 2004.
7. <http://www.renishaw.com>.
8. Кручинин Д.Ю. Фотолитография в производстве круговых оптических шкал на Уральском оптико-механическом заводе // Оптический журнал. 2008. Т. 75. № 4. С. 92–94.