

УДК 531.715.2

В. И. Гужов, В. Г. Нечаев, В. М. Корнев, З. И. Штейнгольц

(Новосибирск)

**ИЗМЕРЕНИЕ АБСОЛЮТНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ  
НА ОСНОВЕ РАСТРОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЛИНЕЕК  
С ЦЕЛОЧИСЛЕННЫМ КОДИРОВАНИЕМ**

Приведены результаты исследований измерителей перемещений, в основу работы которых положен принцип фотоэлектрического считывания оптической плотности периодической растровой структуры. На основе предложенного целочисленного способа кодирования абсолютных значений даны рекомендации по построению измерителей абсолютных перемещений с минимальным числом растровых шкал.

**Введение.** Основной частью существующих измерителей абсолютных перемещений, построенных на основе кодовых оптических линеек, является шкала, состоящая из набора растров. При перемещении подвижной части, на которой закреплено оптическое устройство считывания, относительно неподвижной шкалы при пересечении растровых отступов вырабатывается кодовый сигнал, соответствующий определенному перемещению. Каждый растр кодовой шкалы обеспечивает определение одного бита в коде абсолютного перемещения. Количество растров определяется числом состояний, которые должны различаться на заданном диапазоне. Таким образом, при точности измерений порядка 1 мкм и диапазоне до 1 м необходимо различать  $10^6$  состояний. Для этого необходимо 20 двоичных разрядов в коде перемещения или достаточное количество растров на кодовой шкале [1].

Число растров на кодовой шкале можно уменьшить, если из одного растра в каждом положении получать более одного бита информации. Этого можно достичь, например, использованием оптических дифракционных элементов, обеспечивающих угловое отклонение считывающего светового пучка в каждой точке измерительной шкалы [2]. Другая возможность уменьшения числа растров связана с разработкой методов специального кодирования измерительных сигналов последовательного счета в модифицированных измерителях относительных перемещений на основе фотоэлектрических растровых преобразователей.

В данной статье предложен новый способ построения измерителей абсолютных перемещений на основе существующих преобразователей последовательного счета с применением целочисленного кодирования. Рассмотрена структура устройства, требования к точностным характеристикам при изготовлении. Рассмотрен существующий преобразователь линейных перемещений, в основу работы которого положен принцип перемещения одной растровой меры относительно другой. Исследованы предельные метрологические характеристики такого преобразователя, которые позволяют создать на его основе новый тип измерителей абсолютных перемещений.

Структура измерителя абсолютных перемещений с целочисленным кодированием. Для определения абсолютного перемещения предлагается использовать фотоэлектрический преобразователь, обеспечивающий считывание синусоидальных и косинусоидальных периодических сигналов различного периода при перемещении подвижной части измерителя относительно не-

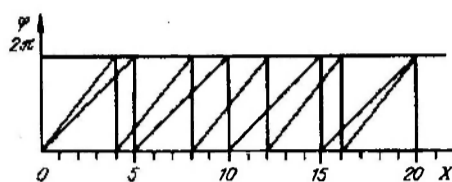


Рис. 1. Система двух пилообразных фазовых функций, восстановленных из набора синусов и косинусов с периодами 4 и 5

подвижной. Информацию о перемещении можно извлечь из текущей фазы информационного сигнала. Для этого измеряются

амплитуды синусного и косинусного сигналов и фаза находится из соотношения  $\varphi = \text{arctg} A_s/A_c$ , где  $A_s$  и  $A_c$  — амплитуды синусного и косинусного сигналов. Фаза гармонического сигнала определяется как  $\varphi = 2\pi n x/T$ , где  $n = 0, 1, 2, \dots, x$  — линейное перемещение,  $T$  — период сигнала.

На рис. 1 показана система двух пилообразных функций фаз, вычисленных по амплитудам синусного и косинусного сигналов с периодами 4 и 5. Диапазон изменения фаз  $0 + 2\pi$ . Периодичность является следствием фазовой неоднозначности, возникающей при определении фазы по амплитудным значениям.

Масштабируя каждую из функций так, чтобы диапазон изменения равнялся периоду, перейдем к системе остаточных функций, где каждая функция представляет собой остаток от деления абсолютного перемещения на значение периода (рис. 2).

Набор остатков функций с различными периодами позволяет однозначно восстановить абсолютные значения перемещения. Это можно сделать, составив таблицу соответствия набора остатков определенному абсолютному значению. Через некоторый период сочетания остатков повторяются. Период однозначного определения перемещений по остаткам становится максимальным, если целые числа, поставленные в соответствие периодам, являются взаимно простыми. Необходимо отметить, что в соответствие периоду должно ставиться целое число, не большее числа точек, достоверно измеряемых в пределах периода.

При одновременном измерении фазы нескольких гармонических сигналов, периоды которых соотносятся как взаимно простые числа в диапазоне, определяемом произведением периодов, набор фаз с точностью до периода никогда не повторится. При этом совокупность значений фаз определит однозначно абсолютное перемещение. В этом случае можно восстановить абсолютные значения, воспользовавшись теоремой об остатках, хорошо известной в теории чисел [3]. Аналогичный способ для определения полной фазы при интерференционных исследованиях более подробно описан в [4, 5].

Теорема об остатках позволяет по системе сравнений в аналитической форме найти абсолютные значения. Например, для системы, приведенной на рис. 2, можно найти линейную функцию для определения абсолютных значений  $x = 5b_1 + 16b_2(\text{mod}20)$ , где  $b_1$  и  $b_2$  — значения соответствующих остаточных функций. Период этой функции равен произведению периодов, для которых найдены остатки.

Из теоремы об остатках следует также, что диапазон измерения перемещений можно расширить, увеличивая либо число сравнений при разных модулях, либо абсолютные значения модулей. Увеличение абсолютных значений эквивалентно повышению точности измерений. Например, если точность измерений позволяет найти значимые значения остатков при периодах 53 и 63 (взаимно простые числа), то диапазон единственности при нахождении абсолютных значений будет равен 3339.

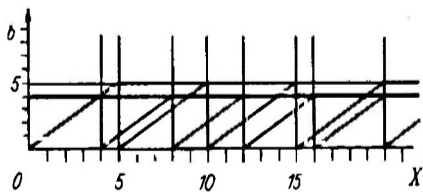
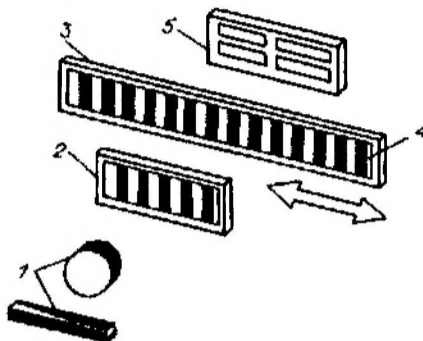


Рис. 2. Система двух пилообразных функций с периодами 4 и 5, по которым можно однозначно восстановить линейную пилообразную функцию с периодом 20

Рис. 3. Структурная схема исследуемого преобразователя линейных перемещений:

1 — источник освещения, 2 — индикаторный растр, 3 — оптическая линейка, 4 — измерительный растр, 5 — фотоприемники



Таким образом, если одновременно измерять несколько периодических сигналов с разными периодами, то совокупность фаз определяет единственное значение абсолютного перемещения. Для нахождения абсолютного перемещения в диапазоне 1 м необходимы три системы сравнений с растрами, имеющими отличающиеся размеры периода (около 100 мкм). В пределах каждого из периодов необходимо измерять не менее 100 точек, что обеспечит требуемое число отсчетов  $10^6$ . Точное значение периодов определяется из условия взаимной простоты чисел, соответствующих периодам растра, и технологических условий изготовления оптических линеек.

Возможность получения нескольких взаимосвязанных гармонических функций с различными периодами существует, так как в настоящее время выпускаются преобразователи линейных перемещений последовательного счета, в которых при перемещении подвижной части относительно неподвижной вырабатываются синусоидальные и косинусоидальные сигналы заданных периодов.

В следующем разделе описаны подобный преобразователь и измерительная система для определения его метрологических характеристик. Исследование характеристик проводилось с целью изучения возможности применения подобных преобразователей для построения на их основе измерителей абсолютных перемещений.

Исследование информационных сигналов фотоэлектрического растрового преобразователя линейных перемещений. Исследовался измеритель линейных перемещений, в основу работы которого положен принцип фотоэлектрического считывания оптической плотности периодической растровой структуры. Структурная схема исследуемого преобразователя показана на рис. 3.

Измеритель состоит из подвижной и неподвижной частей. При перемещении измерительной меры относительно индикаторного растра за счет эффекта оптического наложения возникает периодическое изменение интенсивности проходящего света, которое фиксируется пространственными фотодиодами. Каждый фотодиод улавливает свет от нескольких периодов растра.

Индикаторный растр и растр на оптической линейке имеют одинаковую форму и представляют собой чередующиеся прозрачные и непрозрачные проежутки равного размера. Период растра исследуемого преобразователя был равен 20 мкм. Регистрируемый сигнал при прохождении света через растровое опражнение, выполненное с зазором около двух растровых периодов, за счет ифракционных эффектов и пространственного усреднения по 100 периодам приобретает форму, близкую к гармонической.

Интенсивность света считывается с помощью четырех фотодиодов. Фотодиоды сдвинуты друг относительно друга на четверть периода. Фотодиоды, сдвинутые на половину периода, соединяются параллельно по два для исключения постоянной составляющей сигнала. Таким образом, с выходов фотодиодов выделяются токовые сигналы синусоидальной и косинусоидальной формы.

Для измерения точной формы сигнала и исследования точностных характеристик была разработана интерференционная система (рис. 4). Система состоит из интерферометра Тваймана — Грина, интерферирующие пучки в котором отражаются от зеркал, закрепленных на подвижной и неподвижной частях измерителя. Схема построена так, чтобы обеспечить измерение относительных перемещений подвижной и неподвижной частей. Наблюдаемая интерференционная картина имеет структуру параллельных полос с периодом

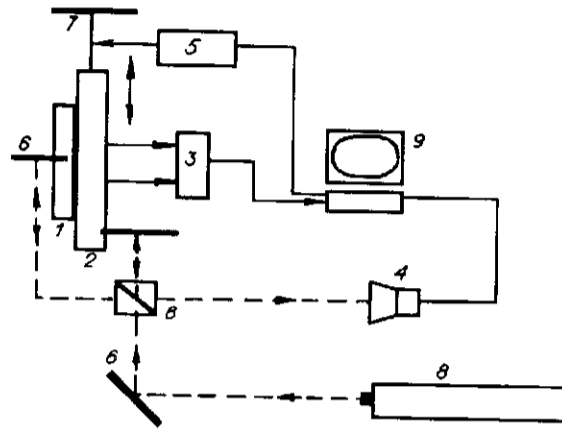


Рис. 4. Измерительная система:

1 — неподвижная часть преобразователя линейных перемещений, 2 — перемещаемая часть преобразователя линейных перемещений, 3 — аналого-цифровой преобразователь, 4 — устройство ввода оптических изображений, 5 — шаговый двигатель с устройством управления, 6 — зеркала, 7 — стальная струна, 8 — лазер, 9 — компьютер (штриховые линии — ход оптических лучей)

0,5 длины волны используемого источника освещения. В описываемой системе использовался He—Ne-лазер.

Перемещение подвижной и неподвижной частей оптического преобразователя осуществлялось с помощью управляемого от компьютера шагового двигателя, передающего усилие на стальную струну, связанную с подвижной частью линейки. Это позволило вследствие снижения «дребезга» интерференционных полос, вызванного вибрациями шагового двигателя, уменьшить измеряемый шаг перемещения до 0,05 длины волны. При этом интерференционные полосы перемещаются пропорционально заданному шаговому двигателем сдвигу.

Интерференционная картина с помощью устройства ввода и оцифровки оптических изображений вводилась в компьютер для контроля за точностью задаваемого перемещения. Использовалось устройство ввода на основе телевизионной камеры форматом  $768 \times 576 \times 8$  бит. Расстояние между полосами определялось выделением пиков после пространственного усреднения по нескольким полосам.

Аналоговый сигнал с выхода измерителя поступал на вход двухканального 12-разрядного аналого-цифрового преобразователя для ввода в компьютер синусоидальных и косинусоидальных сигналов, выдаваемых преобразователем перемещений. В компьютере производилось цифровое сравнение сигналов со значениями перемещений, полученными из интерференционных измерений.

Экспериментальная установка обеспечивала измерения амплитуды информационных сигналов синуса и косинуса с разрешением 4096 отсчетов. При этом линейная точность измерения перемещений составляла около 0,05 мкм. Для устранения влияния внешних факторов на повторяемость результатов измерений были приняты специальные меры по температурной стабилизации установки, исключению турбулентности воздушных потоков и защите от вибраций. В результате исследования было установлено, что форма выходных сигналов близка к гармонической и разброс значений фаз информационного сигнала для взаимно соответствующих точек периода на измеряемом диапазоне 150 мм составляет не более 0,5%. Это соответствует возможности использования 200 различаемых отсчетов на измеряемом периоде 20 мкм. Полученные результаты измерений достаточны для реализации алгоритма целочисленного кодирования.

#### ВЫВОДЫ

Предложенный алгоритм целочисленного кодирования позволяет реализовать измерения абсолютных перемещений при использовании информационных сигналов фотоэлектрических растровых преобразователей линейных перемещений.

Приведенные исследования предельной разрешающей способности преобразователей линейных перемещений показали возможность использования алгоритмов целочисленного кодирования для определения абсолютных перемещений.

Проведенная оценка параметров растровых линеек показала, что для создания с использованием целочисленного кодирования измерителей абсолютных перемещений с количеством различных состояний  $10^6$  в диапазоне до 1 м достаточно трех растров с отличающимися периодами, близкими к 100 мкм.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Преснухин Л. Н., Шаньгин В. Ф., Майоров С. А., Меськин И. В. Фотоэлектрические преобразователи информации. М.: Машиностроение, 1974.
2. Бобров С. Т., Грейсх Г. И., Туркевич Ю. Г. Оптика дифракционных элементов и систем. Л.: Машиностроение, 1986.
3. Виноградов И. М. Теория чисел. М., 1978.
4. Гужов В. И., Солодкин Ю. Н. Использование свойств целых чисел для расшифровки интерферограмм // Оптика и спектроскопия. 1988. 65, вып. 5.
5. Гужов В. И., Солодкин Ю. Н. Анализ точности определения полной разности фаз в целочисленных интерферометрах // Автометрия. 1992. № 6.

*Поступила в редакцию 4 апреля 1994 г.*