

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Астафьева Т. Б., Бычков Р. М., Коронкевич В. П. и др. Применение методов когерентной оптики для контроля геометрических параметров изделий // Автоматизация научных исследований на основе применения ЭВМ: Всесоюз. конф.— Новосибирск: ИАиЭ СО АН СССР, 1979.
2. Богомолов Е. Н., Ведерников В. М., Вертопрахов В. В. и др. Оптико-электронная система измерения размеров движущихся объектов на основе рассеяния световых волн // Автометрия.— 1981.— № 1.
3. Богомолов Е. Н., Вертопрахов В. В., Чугуй Ю. В., Юношев В. П. Быстродействующее оптическое контрольно-измерительное устройство // Измер. техника.— 1985.— № 11.
4. А. с. 1185080 СССР. Устройство для измерения размеров изделий/Е. Н. Богомолов, В. В. Вертопрахов, С. В. Михляев и др.— Заявл. 30.09.83; Оpubл. 15.06.85, Бюл. № 38.
5. Богомолов Е. Н., Василенко Ю. Г., Василец Н. В. и др. Высокопроизводительный оптический измеритель размеров «Контур-2» // Автометрия.— 1987.— № 3.
6. ГОСТ 24642—81(СТ СЭВ 301—76). Допуски формы и расположения поверхностей. Основные термины и определения.— Введ. 01.07.81.— М.: Изд-во стандартов, 1984.
7. Вертопрахов В. В. Оконтуривание бинарных объектов в частично когерентном полихроматическом свете // Автометрия.— 1989.— № 5.
8. А. с. 1416866 СССР. Устройство для измерения размеров изделий/В. В. Вертопрахов, Ю. В. Чугуй.— Заявл. 25.08.86; Оpubл. 15.04.88, Бюл. № 30.
9. Спектор Б. И., Твердохлеб П. Е., Трубецкой А. В., Щербаченко А. М. Лазерная запись высокоинформативных изображений // Автометрия.— 1985.— № 6.

Поступила в редакцию 20 апреля 1989 г.

УДК 681.17.18 : 681.32 : 658.562

**Е. Н. БОГОМОЛОВ, Н. В. ВАСИЛЕЦ, Б. Е. КРИВЕНКОВ, Ю. В. ЧУГУЙ,
Л. М. ШУЛЬЖЕНКО, В. П. ЮНОШЕВ, И. В. ЯРОСЛАВЦЕВ**

(Новосибирск)

ФОТОДИОДНЫЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ РАЗМЕРОВ «СЕНСОР»

Современное приборостроение испытывает острую потребность в высокопроизводительных системах бесконтактного контроля геометрических параметров промышленных изделий [1]. Такие системы должны обладать большой точностью (погрешность единицы микрометров и менее) и быстродействием (сотни измерений в секунду), высокими пространственным разрешением и надежностью, достаточным измерительным объемом. Удовлетворить этим, зачастую противоречивым, требованиям удается при использовании оптико-электронных методов измерений, в частности на основе интегральных многоэлементных фотоприемников — фотодиодных линеек [2]. Эти фотоприемники в сравнении с широко распространенными ПЗС-линейками выгодно отличаются хорошей температурной стабильностью, отсутствием эффекта «растекания» заряда, более простой электронной схемой управления. Однако, как правило, они обладают большим разбросом чувствительности элементов.

На основе интегральных фотодиодных линеек Институтом автоматики и электрометрии совместно с СКБ научного приборостроения СО АН СССР в 1985—1986 гг. разработан и создан высокопроизводительный оптико-электронный измеритель размеров «Сенсор» для измерения и контроля размеров среднегабаритных (до 50 мм) изделий.

В предлагаемой работе описаны принцип действия, алгоритм определения размеров и программное обеспечение измерителя. На основании экспериментальных исследований анализируются его точностные характеристики.

Принцип действия, состав и работа измерителя. В основу принципа действия прибора положен теневой метод измерений, который предпола-

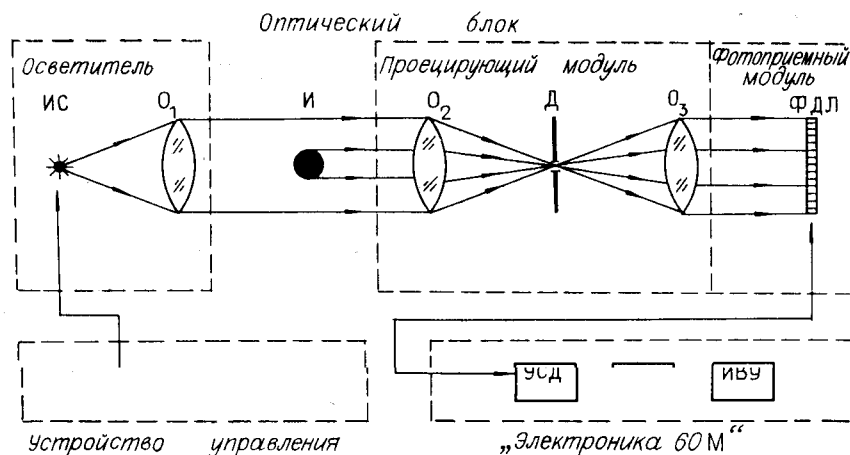


Рис. 1

гает оптическое проецирование изображения изделия в плоскость фотодиодной линейки (ФДЛ) и последующее его электронное сканирование. Полученный сигнал с ФДЛ затем оцифровывается и в виде отсчетов поступает в микроЭВМ. Благодаря «жесткой» геометрии раstra линейки каждый из этих отсчетов с высокой точностью характеризует пространственное распределение интенсивности света изображения изделия в выбранном сечении, соответствующем приведенному ко входу положению линейки. Требуемые геометрические параметры определяются путем математической обработки результатов измерений в соответствии с принятым алгоритмом.

Блок-схема прибора приведена на рис. 1. Измеритель включает в себя оптический блок, состоящий из одного или двух идентичных каналов (на рисунке показан один канал), и электронный блок, в который входят устройство управления и микроЭВМ «Электроника 60М». Электронный блок обеспечивает работу в одно- или двухканальных вариантах и при необходимости может быть расширен до четырехканального. Многоканальная конфигурация оптического блока позволяет осуществлять работу измерителя в двух режимах измерений: прямом, при котором на ФДЛ регистрируются оба края изделия, и дифференциальном с раздельной регистрацией краев изделия на каждой из ФДЛ (рис. 2).

Оптический блок предназначен для формирования теневого изображения контролируемого изделия на фотодиодной линейке. Конструктивно он выполнен в виде отдельных модулей, при этом каждый из его каналов содержит три модуля: осветительный, проецирующий и фотоприемный. Осветитель служит для формирования квазипараллельного освещающего пучка и включает в себя источник света (ИС) на основе излучающего диода АЛ119Б [3] и коллимирующий объектив (O_1), в качестве которого используется светосильный семиллинзовый анастигмат «Юпитер-3» (фокусное расстояние 50 мм и относительное отверстие 1:1,5). Проецирующий модуль выполнен на основе двух аналогичных объективов «Юпитер-3» (O_2 и O_3 на рис. 1), расположенных (с целью снижения дисторсии) по симметричной схеме. Между ними в плоскости изображения источника установлена полевая диафрагма (Д) диаметром 1,1—1,3 мм. Фотоприемный модуль состоит из фотодиодной линейки ЛФ 1024-25 (размеры светочувствительных элементов 19×19 мкм или

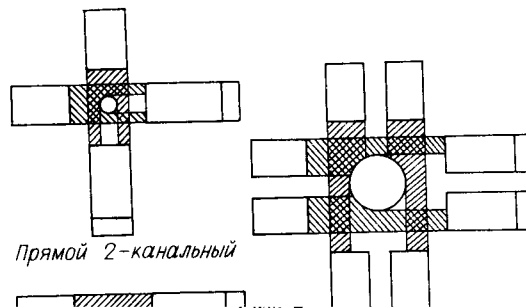
19 × 150 мкм, шаг между ними 25 мкм, количество элементов 1024), а также усилителя выходного сигнала ФДЛ.

Устройство управления, конструктивно выполненное в стандарте «Евромеханика», в качестве основных функциональных элементов содержит источник питания осветителей

ДЛИТЕЛЬНОСТЬ В ДИАПАЗОНЕ 20—60 мкс, тактовых синхросигналов и импульсов запуска ФДЛ. Назначение устройства управления фотодиодными линейками — формирование сигналов управления двумя ФДЛ и обработка (двойная коррелированная выборка) выходных сигналов фотоприемных модулей.

С помощью микроЭВМ «Электроника 60М» осуществляется управление работой измерителя, оцифровка поступающих с устройства управления ФДЛ данных и последующее вычисление по полученным отсчетам геометрических параметров изделия, а также статистическая обработка результатов измерений. Кроме того, на нее могут быть возложены некоторые функции управления технологическим процессом (например, выдача управляющих сигналов на устройство подачи и разбраковки), документирование результатов контроля, сервис и т. д. В состав микроЭВМ, кроме стандартных модулей (минимальный набор которых содержит процессор (П), оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) и интерфейсы к дисплею (ИД) и внешнему ЗУ (ИВУ)), входит оригинальный модуль — устройство считывания данных (УСД). Оно осуществляет преобразование сигналов, поступающих с УУ ФДЛ, в цифровой 8-разрядный двоичный код, коррекцию неравномерности чувствительности элементов ФДЛ и запоминание скорректированного результата в буферном запоминающем устройстве (объем 4 К 16-разрядных двоичных слов). Коррекция неравномерности выполняется с помощью заранее рассчитанных и хранящихся в этом же буферном ЗУ корректирующих коэффициентов.

Измеритель работает следующим образом. Контролируемое изделие (И) освещается квазипараллельным пучком света, и с помощью проецирующего модуля в плоскости фотодиодной линейки формируется его теневое изображение. В течение времени, соответствующего длительности импульса засветки, происходит накопление (в выбранном сечении) изображения на светочувствительных элементах ФДЛ. Затем задний фронт импульса засветки запускает режим считывания накопленного изображения, в процессе которого сигналы с каждой фотодиодной линейки поступают (через устройство управления ФДЛ) на вход УСД. После окончания считывания данных формируется очередной импульс засветки. Поступивший в УСД сигнал оцифровывается и записывается в буферное ЗУ. Одновременно с записью происходит коррекция неравномерности элементов ФДЛ путем цифрового аппаратного умножения поступающих отсчетов на соответствующие корректирующие коэффициенты. По полученным данным в соответствии с алгоритмом, описанным ниже, вычисляется размер изделия в контролируемом сечении. По окончании этих вычислений и поступлении очередного импульса засветки цикл измерений (если это необходимо) повторяется.



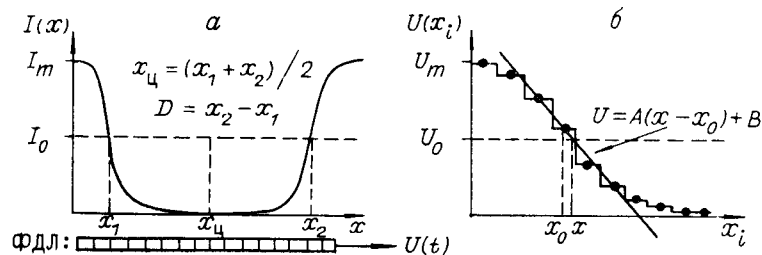


Рис. 3

Алгоритм определения размеров и программное обеспечение. Алгоритм определения геометрических параметров изделия предусматривает нахождение координат его краев и последующее вычисление по ним требуемых параметров. Например, диаметр изделия D в выбранном сечении определяется как разность координат краев, а положение центра $x_{ц}$ — как их полусумма (рис. 3, а). Заметим, что последний параметр используется при определении несоосности или прогиба изделий типа тел вращения. Таким образом, задача точного определения координаты края изображения изделия является основной в рассматриваемом алгоритме, и от успешного ее решения во многом зависят точностные характеристики измерителя.

Так как каждый из отсчетов сигнала с ФДЛ соответствует светочувствительному элементу линейки с известным номером i и, следовательно, с известной координатой x_i его центра в пространстве, то, сравнивая значения этих отсчетов U_i с порогом U_0 (по уровню $1/2$ от максимальной освещенности U_m), можно легко определить координату края x с точностью до элемента разрешения ФДЛ, который равен шагу Δx между элементами линейки (рис. 3, б). Такая низкая точность определения координаты края для многих практически важных случаев неприемлема. Поэтому возникает задача ее радикального повышения. Нетрудно понять, что, используя отсчеты сигнала с соседних элементов, путем математической обработки можно восстановить профиль изображения края (который имеет конечную ширину, определяемую разрешением проецирующей оптической системы) и тем самым в несколько раз повысить точность измерения его координаты. В предложенном нами алгоритме с целью минимизации объема вычислений для уточнения положения края используется линейная аппроксимация распределения интенсивности света в его изображении

$$U = A(x - x_0) + B. \quad (1)$$

При этом координата края

$$x = x_0 + (U_0 - B)/A, \quad (2)$$

где $U_0 = \max_i \{U_i\}/2$, а параметры линейной зависимости A и B определяются по методу наименьших квадратов с использованием нечетного количества $N = 2n + 1$ ($n = 1, 2, \dots$) отсчетов сигнала по формулам

$$A = \frac{\sum_{i=-n}^n (x_i - x_0) U_i}{\sum_{i=-n}^n (x_i - x_0)^2}; \quad (3a)$$

$$B = \frac{\sum_{i=-n}^n U_i}{N}, \quad (3б)$$

а $x_i = x_0 + i\Delta x$.

Выбор оптимального количества используемых для аппроксимации отсчетов обсуждается ниже.

Заметим, что алгоритм определения размеров предусматривает также коррекцию aberrаций оптической проецирующей системы (подробно

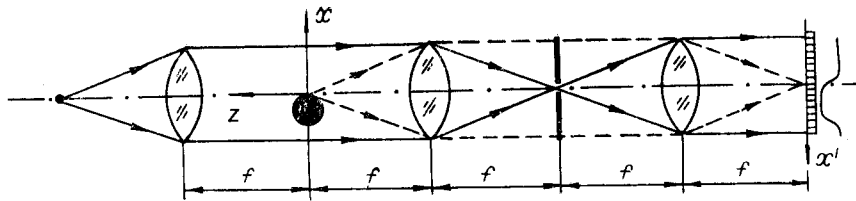


Рис. 4

он рассмотрен в разделе, посвященном анализу погрешностей измерителя).

Важной составной частью измерителя является его программное обеспечение, включающее в себя основную программу и набор используемых при ее работе программных модулей (подпрограмм). Программа предусматривает несколько режимов работы прибора, включая стартовый, измерения, калибровки, а также ряд дополнительных режимов, используемых при настройке измерителя. В стартовом режиме осуществляются расчет корректирующих коэффициентов и запись их в буферное ЗУ устройства считывания данных, определение необходимых констант и др. Режим измерения основной. Он предусматривает определение размеров изделия, принятие решения об его годности или браке, статистическую обработку и вывод результатов измерений. Это наиболее изменяемая часть программного обеспечения, так как в ней необходимо учитывать специфику контролируемых изделий, другие особенности технологического процесса контроля. Режим калибровки вспомогательный. Он используется при калибровке измерителя и расчета данных, необходимых для последующей коррекции aberrаций. Основная программа реализована на языке QUASIC.

Подпрограммы, используемые основной программой в процессе работы, можно условно разделить на три группы. Первая из них объединяет подпрограммы считывания данных с ФДЛ, расчета и записи в буферное ЗУ устройства считывания данных корректирующих коэффициентов и чтения данных из буферного ЗУ в оперативную память ЭВМ. Вторая группа подпрограмм реализует принятый алгоритм вычисления размеров и состоит из подпрограмм определения координат краев изделия с точностью до элемента разрешения ФДЛ, уточнения полученных координат с помощью линейной аппроксимации и коррекции aberrаций оптической системы измерителя. Третья группа включает в себя подпрограммы статистической обработки результатов измерений. С целью снижения времени вычислений все эти подпрограммы реализованы на языке Ассемблер.

Исследование точностных характеристик. Исследование основных источников погрешностей измерений и оценка их уровня проводились на макете оптического блока измерителя. На рис. 4 показана принципиальная схема макета и введены обозначения, которые будут использоваться в дальнейшем. В качестве тестовых объектов применялись цилиндрические калибры, аттестованные с погрешностью ± 2 мкм. Их позиционирование в рабочем поле измерителя осуществлялось с помощью прецизионного двухкоординатного столика (погрешность позиционирования 1 мкм). Основным параметром, характеризующим точностные характеристики измерителя, служила величина погрешности определения координаты края изделия.

Исследовались источники погрешности измерений, обусловленные шумами оптического и электронного трактов измерителя и связанной с ними остаточной (нескорректированной) неравномерностью чувствительности элементов ФДЛ (случайная погрешность Δ_1), конечным размером элемента разрешения ФДЛ (погрешность аппроксимации Δ_2), aberrациями проецирующей оптики (погрешность aberrаций Δ_3) и смещением контролируемого изделия вдоль оптической оси (погрешность дефокусировки Δ_4).



Рис. 5

Существенно, что последние две составляющие определяют измерительный объем прибора — область пространства $\Delta X \Delta Z$, в пределах которой смещение изделия не сказывается на точностных характеристиках измерителя.

Оценим теперь каждую из составляющих результирующей погрешности измерений.

Случайная погрешность. Эксперименты показывают, что нескорректированная неравномерность чувствительности элементов ФДЛ не превышает 1 % от уровня сигнала, соответствующего максимальной освещенности, и при этом погрешность Δ_1 определения координаты не превышает (с вероятностью 0,95) $\pm 0,25$ мкм. Этот результат хорошо согласуется с приведенным в [4].

Погрешность аппроксимации. Для проецирующей оптической системы с конечным разрешением, определяемым ее импульсным откликом, распределение интенсивности света в изображении края описывается нелинейной функцией. Однако внутри некоторой области с центром в точке перегиба оно с достаточной степенью точности может считаться линейным. Наклон этого линейного участка и, следовательно, количество ΔN элементов разрешения (отсчетов сигнала, приходящихся на него) могут меняться в пределах от 3 (при точной фокусировке) до 7 (при дефокусировке ± 5 мм) элементов. При аппроксимации профиля края возникает ошибка в определении его координаты, зависящая от соотношения между шириной ΔN края, заданным количеством N используемых для аппроксимации отсчетов и положением края относительно элементов ФДЛ. Для выяснения механизма возникновения этой погрешности обратимся к рис. 5, на котором условно изображены отсчеты распределения интенсивности для случаев $N = 5$ и $\Delta N = 3$. На рис. 5, а приведен пример ситуации, возникающей при некотором положении края относительно элементов ФДЛ, когда нулевой отсчет (определяемый при сравнении с уровнем U_0) незначительно превышает порог. Отметим, что для выбранного N вычисление параметров аппроксимирующей прямой осуществляется при использовании как отсчетов, лежащих в области линейности ($-1, 0$ и 1), так и отсчетов, лежащих за ее пределами ($-2, 2$). Так как отсчеты расположены симметрично относительно прямой, проведенной через точки $-1, 0, 1$, то параметры этой прямой не изменяются. Иная ситуация возникает (рис. 5, б), когда нулевой отсчет значительно превышает порог. В этом случае вклад точек -2 и -1 , соответствующих нелинейной области, приводит к отклонению аппроксимирующей прямой от прямой, проведенной через линейный участок, которому соответствуют отсчеты $0, 1$ и 2 (на рис. 5, б показана штриховыми линиями), что проявляется в соответствующей погрешности определения координаты края. При произвольном положении края относительно элементов линейки возможны все промежуточные варианты.

С целью определения величины погрешности аппроксимации и выбора оптимального количества отсчетов, обеспечивающих минимальную погрешность Δ_2 , исследовалась ее зависимость от количества отсчетов N , используемых при аппроксимации и резкости (ширины) изображения края ΔN . Регистрировалась разность $\delta(x) = x' - x$, где x' — измеренная

координата, а x — координата края в плоскости объекта для последовательных значений x с шагом 5 мкм (начала отсчетов x и x' совмещены). Типичные результаты приведены на рис. 6 для N и ΔN , равных 3, 5 и 7 отсчетам. Экспериментальные точки для наглядности соединены ломаной и разнесены вдоль оси ординат. Анализируя эти результаты, можно видеть, что чем резче край (ΔN меньше), тем погрешность аппроксимации выше. При этом хорошо заметна периодическая (с периодом 25 мкм, равным шагу между элементами) составляющая погрешности. Минимального значения эта погрешность достигает при использовании для аппроксимации 5 отсчетов и, как показывают эти и другие эксперименты, не превышает ± 1 мкм.

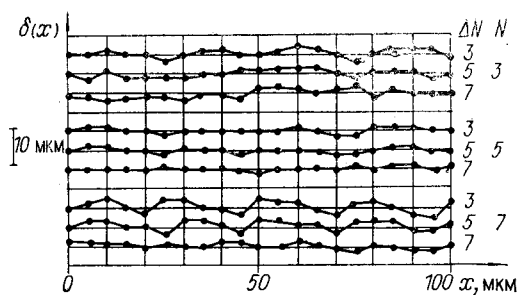


Рис. 6

Отметим, что снижение погрешности аппроксимации путем расфокусировки изображения края (увеличение ΔN) нецелесообразно, так как это приводит к возрастанию случайной погрешности вследствие уменьшения крутизны изображения края.

Погрешность aberrаций. Геометрические aberrации оптической системы приводят к нелинейной зависимости координаты x' изображения края от его положения x на входе. В качестве примера на рис. 7, а приведена aberrационная характеристика $\delta(x) = x' - x$ проецирующей оптической системы экспериментального макета измерителя. Можно видеть, что в зависимости от положения края в рабочем поле погрешность aberrаций Δ_3 составляет величину ± 8 мкм. Как показывают эксперименты, вид этой aberrационной характеристики в сильной степени определяется конкретным исполнением проецирующего модуля (параметрами используемых объективов, качеством их юстировки и т. д.), а погрешность Δ_3 может достигать величины ± 15 — 20 мкм.

Нами исследовались возможности двух методов коррекции aberrаций оптической системы. Первый из них основан на аппроксимации aberrационной характеристики полиномом третьей степени. В этом случае выходная координата x' пересчитывается ко входу по формуле

$$x = m_1 x' + m_2 (x')^2 + m_3 (x')^3, \quad (4)$$

где параметры m_1 , m_2 , m_3 определяются при калибровке измерителя. Заметим, что m_1 — это масштабный коэффициент, а m_2 и m_3 соответственно описывают квадратичную и кубическую составляющие aberrационной характеристики. Экспериментально показано, что при использовании для коррекции aberrаций соотношения (4) удается снизить соответствующую погрешность Δ_3 лишь до ± 5 мкм (рис. 7, б). Это объясняется тем, что полином третьей степени плохо аппроксимирует реальную aberrационную характеристику. Применение полинома более высокой степени нецелесообразно из-за резкого увеличения объема вычислений, что ведет к снижению быстродействия измерителя.

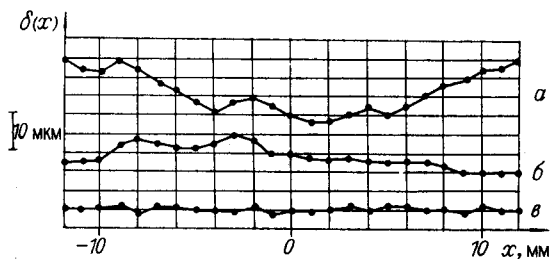


Рис. 7

Радикального снижения влияния aberrаций на точностные характеристики измерителя можно достичь, применяя второй метод, на основе табличной коррекции. Суть его состоит в использовании предварительно полученных отсчетов $\delta(x)$ aberrационной характеристики для компенсации

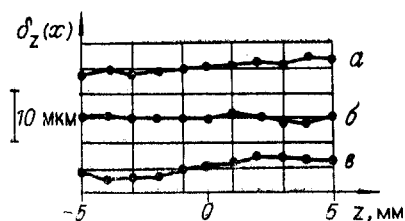


Рис. 8

терного интервала (0,5—1 мм) изменения аберрационной характеристики. Точность метода иллюстрируется на рис. 7, в. Можно видеть, что погрешность Δ_3 нескомпенсированных аберраций в этом случае не превышает во всем рабочем поле измерителя ± 1 мкм.

Погрешность дефокусировки. Требование достижения возможно большего измерительного объема означает, что измеритель должен обеспечивать заданную точность измерений не только при точном позиционировании изделия, но и при любом его положении по x и z в рабочем поле (см. рис. 4). Смещение изделия вдоль оптической оси z приводит к ошибке в измерении его размеров из-за дефокусировки. Для оценки величины этой погрешности Δ_4 экспериментально исследовалась зависимость $\delta_z(x) = x'_z - x$, где x'_z — измеренная координата края цилиндрического калибра, смещенного вдоль оси z , а $x = \text{const}$ — положение его края по координате x .

Так как в настоящее время практически не разработана теория формирования изображения объемных тел (в частности, цилиндрических), а освещающий пучок, создаваемый осветителем, отличается от параллельного из-за конструктивных особенностей применяемого источника света — светодиода АЛ119Б (наличие неконтролируемой по размеру и форме кашлеобразной линзы) и сферической аберрации коллимирующего объектива, то анализ экспериментальных результатов осложнен. Поэтому с целью получения достоверных данных эксперименты проводились с калибрами различных диаметров и при различных положениях одного из его краев по координате x .

В частности, на рис. 8 приведены экспериментально полученные графики зависимости $\delta_z(x) = x'_z - x$ для калибров с диаметрами $D_k = 8, 16$ и 24 мм при положении одного из краев $x = 4, 8$ и 12 мм (графики а, б и в соответственно). Дефокусировка осуществлялась в пределах от -5 до $+5$ мм. Анализ экспериментальных данных показывает, что эта составляющая погрешности во всем рабочем поле при смещениях изделия $\Delta Z = \pm 5$ мм не превышает $\pm 2,5$ мкм.

Определим теперь суммарную погрешность Δ_0 измерения координаты края, в которую входят случайная погрешность Δ_1 , погрешность аппроксимации Δ_2 , остаточная погрешность (после коррекции) аберрации Δ_3 и погрешность дефокусировки Δ_4 . Строгое определение величины погрешности Δ_0 затруднено тем фактом, что погрешности Δ_2, Δ_3 и Δ_4 носят систематический характер. Если учесть, что, как правило, положение изделия в рабочем поле и его размеры произвольны, погрешности Δ_2 и Δ_3 можно с достаточным основанием считать случайными. С учетом изложенного определим суммарную погрешность Δ_0 положения по формуле

$$\Delta_0 = \Delta_4 + \sqrt{\Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \Delta_3^2}. \quad (6)$$

При $\Delta_4 = \pm 2,5$ мкм, $\Delta_1 = \pm 0,25$ мкм, $\Delta_2 = \pm 1$ мкм и $\Delta_3 = \pm 1$ мкм получим, что $\Delta_0 = \pm 4$ мкм. При этом погрешность измерения размера (например, диаметра) $\Delta \approx \sqrt{2}\Delta_0 = \pm 5,6$ мкм.

С целью подтверждения полученной оценки погрешности измерений проводились измерения аттестованных калибров при их различном положении в рабочем поле измерителя: при дефокусировке по z с шагом 1 мм и смещении по x в пределах рабочего поля 25 мм с шагом 0,25 мм. Ре-

искажений путем пересчета координаты края по формуле

$$x = x' - \delta(x), \quad (5)$$

причем промежуточные значения $\delta(x)$ получаются путем линейной интерполяции двух соседних отсчетов этой характеристики. В выражении (5) учтен тот факт, что $\delta(x') \approx \delta(x)$, так как разность $x' - x$ много меньше харак-

D_K , мкм	D_0 , мкм	$D_0 - D_K$, мкм	СКО, мкм	D_K , мкм	D_0 , мкм	$D_0 - D_K$, мкм	СКО, мкм
3 994	3 994	0	2,2	16 000	15 998	-2	2,6
5 945	5 943	-2	2,4	17 991	17 989	-2	2,3
7 981	7 980	-1	2,3	19 997	19 996	-1	2,7
9 056	9 057	1	2,7	2 206	22 004	-2	2,9
11 986	11 986	0	2,6	24 003	24 004	1	2,5
14 001	14 002	1	2,6				

результаты измерений сведены в таблицу. В первой колонке даны диаметры калибров D_K , во второй — средний по всем положениям диаметр D_0 , в третьей — разность $D_0 - D_K$, в четвертой — среднеквадратичное отклонение результатов измерений от среднего. Можно видеть, что средний диаметр и диаметр калибра совпадают в пределах точности аттестации 2,9 мкм, т. е. $\Delta \leq \pm 5,8$ мкм, что согласуется с полученной выше оценкой.

В заключение остановимся еще на одной важной характеристике измерителя — быстродействии. Оно определяется временем цикла одного измерения, которое складывается из времени считывания информации с ФДЛ и времени ее обработки в микроЭВМ. При этом время считывания τ_c зависит от тактовой частоты опроса ФДЛ, которая ограничивается применяемой в электронных узлах элементной базой, в частности временем преобразования аналого-цифрового преобразователя К1108ПВ1, используемого в устройстве считывания данных. При тактовой частоте опроса $f_0 = 0,6$ МГц время считывания информации с линейки $\tau_c = 1,5$ мс.

Время обработки τ_0 определяется быстродействием микроЭВМ, алгоритмом и программами обработки. Последние выбирались таким образом, чтобы минимизировать этот параметр (без существенной потери в точности). В результате время обработки одного измерения было доведено до 3,5 мс, соответственно быстродействие измерителя составило $f = 200$ Гц для одного канала. Очевидно, что при увеличении числа каналов параметр f пропорционально уменьшается.

Технические характеристики измерителя «Сенсор». На основании проведенных экспериментальных исследований приведем основные технические характеристики измерителя: диапазон измерений (при увеличении $\times 1$) в прямом режиме 0,5—24 мм, в дифференциальном — 24—70 мм; разрешение 1 мкм; измерительный объем $\Delta X \Delta Z$ 24 \times 10 мм; погрешность измерений (с вероятностью 0,95) в измерительном объеме ± 6 мкм; быстродействие (для одного канала) 200 Гц; максимальное число каналов 4; габариты: осветителя 135 \times 45 \times 65 мм, проецирующего и фотоприемного модулей 210 \times 45 \times 65 мм.

Опытные образцы измерителя «Сенсор» прошли широкую опытно-промышленную проверку при контроле диаметров цилиндрических изделий, которая подтвердила их технические характеристики и высокие эксплуатационные свойства. На основе таких измерителей могут создаваться системы контроля изделий сложной формы, в том числе с резьбой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Катулин В. А., Малов А. Н. Лазерные контрольно-измерительные системы: проблемы и перспективы // Вестн. АН СССР.— 1986.— № 6.
2. Каган Ю. Х., Кащеев Э. Л., Кругликов С. В. и др. Самосканируемая МДП-интегральная линейка фотоприемников // Автометрия.— 1984.— № 3.
3. Полупроводниковые приборы: Диоды, тиристоры, оптоэлектронные приборы: Справочник/Под ред. Н. Н. Горюнова.— М.: Энергоиздат, 1982.
4. Woschni H. G., Christoph R., Kramer H. Erweiterung der Auflösungsgrenze von Längenmeßsystemen mit CCD-Zeile // Feingerätetechnik.— 1986.— 35, N 9.— S. 403.

Поступила в редакцию 15 мая 1989 г.