

И. И. ЗУБРИНОВ, Д. В. ШЕЛОПУТ, К. Г. ШУМИЛОВ, В. И. ЮРЛОВ

(Новосибирск)

## АКУСТООПТИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЛИНЕЙНЫХ СМЕЩЕНИЙ И ВОЗМОЖНОСТИ ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ

Одна из характерных черт современного технического прогресса — постоянное повышение требований к техническим средствам контроля и измерения геометрических параметров различных инженерных объектов, относящихся к точному машиностроению и станкостроению, космиче- в значительной мере зависит от применяемых первичных преобразователей (датчиков), и в частности преобразователей смещений. В последнее время, судя по ряду источников [1—3], наметился некоторый науч- ный интерес к использованию в качестве таких преобразователей аку- стооптических модуляторов света (АОМ) для измерения различного рода смещений и перемещений.

По своей информационной сущности АОМ — трехмерные преобразо- ватели информации, представленной в пространственно-временном виде. Носителями этой информации являются два вида сигналов — акустиче- ские и световые, каждый из которых описывается трехмерной функцией двух пространственных координат и времени, что позволяет использовать АОМ в самых разнообразных качествах, в том числе для реализации акустооптического преобразователя линейных смещений (АОПЛС).

В настоящей работе предложен один из наиболее перспективных, по мнению авторов, вариантов создания АОПЛС, описан принцип дей- ствия и возможные области применения, приведены данные эксперимен- тальной проверки.

Структурная схема АОПЛС представлена на рис. 1. АОМ жестко связан с объектом перемещений и просвечивается референтным свето- вым пучком (РСП), задающим систему отсчета. При помощи генерато- ров несущего (ГНС) и опорного (ГОС) сигналов с частотами  $\omega$  и  $\Omega$  соответственно и модулятора (М) формируется амплитудно-модулиро- ванный сигнал, поступающий на вход АОМ. В результате в АОМ рас- пространяется модулированная волна деформаций, которая через неко- торое время, определяемое расстоянием  $x$  от входного торца АОМ до

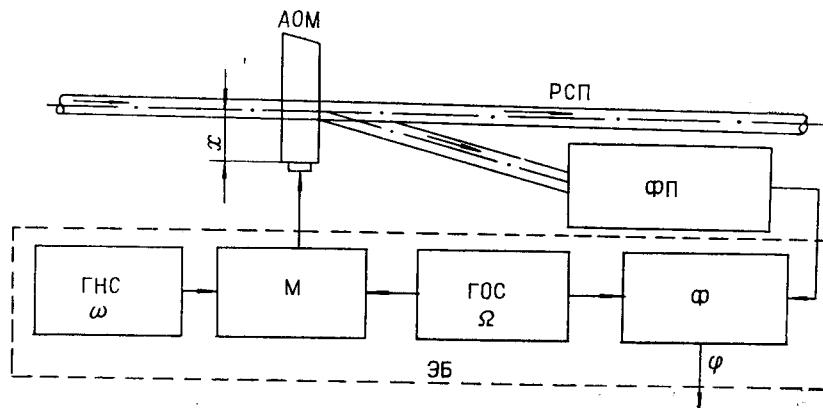


Рис. 1

оси РСП, вступает с последним в акустооптическое взаимодействие. Дифракционный луч детектируется фотоприемником (ФП), имеющим на выходе полосовой фильтр, настроенный на частоту опорного сигнала  $\Omega$ . В результате на выходе фотоприемника выделяется первая гармоника огибающей, сдвинутая по фазе относительно опорного сигнала на величину, определяемую выражением

для сигнала  $\Phi$  по величине  $\Phi$  взаимодействует смещение совмещено относительно РСП. Очевидно, что среднеквадратическая погрешность такого измерения с учетом соотношения (1) будет описываться выражением

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial \Phi}\right)^2 \sigma_\Phi^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial V}\right)^2 \sigma_V^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial \Omega}\right)^2 \sigma_\Omega^2} = \\ &= \sqrt{\left(\frac{V}{\Omega}\right)^2 \sigma_\Phi^2 + \left(\frac{\Phi}{\Omega}\right)^2 \sigma_V^2 + \left(\frac{\Phi V}{\Omega^2}\right)^2 \sigma_\Omega^2},\end{aligned}\quad (2)$$

где  $\sigma_x$ ,  $\sigma_\Phi$ ,  $\sigma_V$ ,  $\sigma_\Omega$  — среднеквадратические погрешности в определении линейного смещения, фазового сдвига, скорости ультразвуковых волн и частоты опорного сигнала соответственно.

Анализируя выражение (2), можно сделать вывод, что для уменьшения погрешности измерения перемещения  $\sigma_x$  необходимо снизить влияние наиболее существенных входящих в нее компонентов, обусловленных погрешностями определения фазового сдвига  $\sigma_\Phi$  и частоты опорного сигнала  $\sigma_\Omega$ , что достигается выбором материала для звукопровода АОМ, обладающего наиболее низкими значениями скорости распространения ультразвуковой волны  $V$ .

Наиболее пригодными с этой точки зрения являются АОМ на основе кристаллов  $\text{TeO}_2$  ( $V = 617$  м/с), КРС-6 ( $V = 2280$  м/с), КРС-5 ( $V = 1920$  м/с) [4] и т. п., а наиболее доступными — выпускаемые промышленностью АОМ типа МЛ 201 на стекле ТФ-7 ( $V = 3630$  м/с). Не меньшее влияние на повышение точности оказывает увеличение значения частоты  $\Omega$ . Однако последнее ограничивается быстродействием фотоприемника, а также шириной РСП и может в различных ситуациях достигать величин от 1 до 100 МГц. Кроме того, с ростом  $\Omega$  неизбежно растут фазовые ошибки  $\sigma_\Phi$ , что также снижает эффективность повышения точности. Погрешность фазовых измерений  $\sigma_\Phi$  включает в себя многие компоненты и в зависимости от частоты меняет свое значение от 0,1 до 1,0°.

Погрешность  $\sigma_V$  характеризуется нестабильностью скорости  $V$  в АОМ. Величина скорости в монокристаллах зависит главным образом от температуры. С учетом этого, например, для АОМ на основе  $\text{TeO}_2$  относительная нестабильность скорости при нормальных условиях может составлять величину порядка [5]  $\Delta V/V \approx 10^{-4}$ .

Относительная нестабильность частоты  $\Omega$  при кварцевом задающем генераторе на сегодняшний день может достигать величины порядка  $10^{-6}$ .

Таким образом, теоретическая оценка погрешности АОПЛС имеет неоднозначный характер и при различных параметрах устройства может изменяться в диапазоне  $0,2 < \sigma_x < 12$  мкм. Причем нижнее значение погрешности соответствует АОМ из  $\text{TeO}_2$  и частоте опорного сигнала 10 МГц, а верхнее — АОМ из ТФ-7 и частоте опорного сигнала 1 МГц. Фазовые ошибки принимаются равными 1°.

Динамический диапазон АОПЛС ограничивается рабочей апертурой АОМ и достигает 100 мм. Для промышленно выпускаемых АОМ типа МЛ 201 он имеет величину 20 мм.

В случае, если в динамический диапазон укладывается несколько длин волн огибающей на частоте  $\Omega$ , возникает неоднозначность фазовых измерений, которая может быть разрешена путем использования многошкальной системы отсчетов при нескольких значениях частоты  $\Omega$  подобно тому, как это делается в фазовых светодальномерах.

Для экспериментальной проверки работоспособности схемы на рис. 1 был собран ее макет и испытан в лабораторных условиях. Оптические элементы макета устанавливались и жестко фиксировались на скамье ОСК-2. Для формирования РСП применялся высокостабильный одномодовый лазер типа ЛГН-302. АОМ располагался в непосредственной близости от лазера ( $\sim 200$  мм) на микрометрическом столике, обеспечивающем плавные поперечные смещения микровинтом с ценой деления лимба 10 мкм. Кроме того, измерение смещений регистрировалось индикатором часового типа с ценой деления 2 мкм. Для детектирования дифракционного луча применялся специально изготовленный фотоприемник на основе фотодиода ФД-10ГА с последующим узкополосным усилителем с центральной частотой 1 МГц. Для генерации несущих колебаний применялись генератор Г4-107 и усилитель УЗ-33, для генерации опорного сигнала на частоте 1 МГц — синтезатор частот Ч6-31. В качестве АОМ использовались три типа модуляторов: МЛ 201 на стекле ТФ-7 с апертурой 20 мм, на кристалле КРС-6 с апертурой 50 мм, на кристалле  $\text{TeO}_2$  с апертурой 5 мм и центральными частотами 75, 45 и 100 МГц соответственно.

Частота опорного сигнала (огибающей) для всех модуляторов составляла величину 1 МГц.

Для измерения фазовых сдвигов применялся фазометр Ф2-16 с цифровым выходом и дискретностью  $0,1^\circ$ . Были сняты зависимости  $\varphi_{\text{изм } i} = f(x_i)$ , по которым определялся усредненный коэффициент преобразования  $\bar{K} = dx/d\varphi$ , и через него пересчитывались значения измеренного смещения  $x_{\text{изм } i}$  как  $x_{\text{изм } i} = \bar{K}\varphi_{\text{изм } i}$ . В результате получались зависимости вида  $x_{\text{изм } i} = \bar{K}f(x_i)$ .

По этим данным вычислялось среднеквадратическое отклонение случайно составляющей погрешности (ССО) в виде

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_1^n (x_i - x_{\text{изм } i})^2}.$$

Зависимости снимались с дискретностью 2, 10, 50 и 200 мкм и 1 мм в различных участках апертуры модуляторов. Измерения неоднократно повторялись. Наибольшее значение СКО для АОМ на стекле ТФ-7 составило величину 6,3 мкм, наименьшее для АОМ на кристалле  $\text{TeO}_2$  — 0,4 мкм, что примерно совпадает с расчетными значениями и удовлетворяет соотношению (2).

Одной из характерных особенностей описанного выше АОПЛС является возможность вести измерения, не затемняя и не искажая волнового фронта референтного светового пучка. В схеме на рис. 1 происходит акустическое зондирование светового луча посредством акустооптического взаимодействия. Цель и результат такого зондирования — определение расстояния, пройденного ультразвуковой волной, на основе принципов пассивной ультразвуковой локации.

Указанное обстоятельство позволяет вести совместный автоматизированный контроль положения нескольких объектов или контрольных точек объекта относительно одного РСП. На рис. 2 показана система АОПЛС для совместного контроля множества контрольных точек. Данная система может быть использована в решении геодезических задач для периодического контроля прямолинейности или плоскостности в процессе эксплуатации таких объектов, как ускорители заряженных частиц, фазированные антенные решетки, направляющие технологических линий и т. п. При значении частоты опорного сигнала не менее 100 кГц время

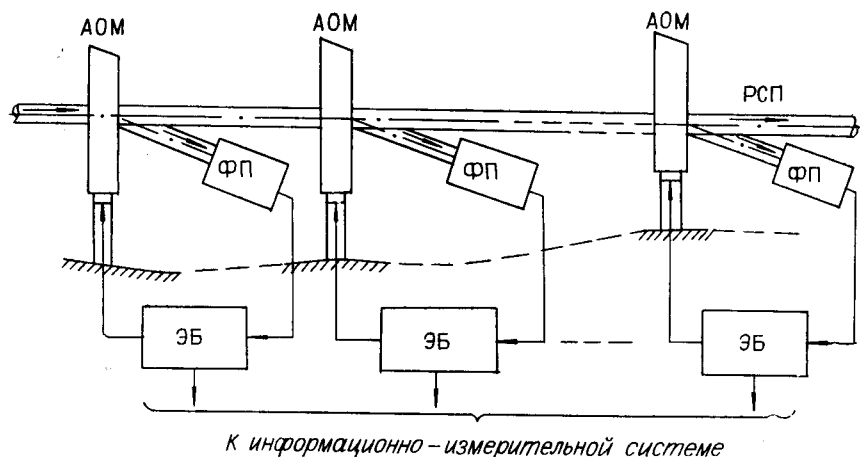


Рис. 2

одного измерения может быть уменьшено до 1 мс. Это значит, что при последовательном включении и выключении АОПЛС, расположенных, например, в 100 контрольных точках по схеме на рис. 2, полное время однократного контроля прямолинейности составит 100 мс. В том случае, если коэффициент дифракции (эффективность) в АОМ много меньше единицы и «откачиваемая» в дифракционный луч световая мощность мала по сравнению с мощностью РСП (т. е. луча нулевого порядка), измерения можно вести одновременно. При этом быстродействие системы будет равно быстродействию одного АОПЛС.

В тех случаях, когда быстродействия не требуется, измерения могут проводиться при помощи трех АОПЛС. При этом два из них должны быть установлены в начале и в конце контролируемого профиля для фиксации мгновенного положения РСП, а третий — плавно или дискретно перемещаться вдоль всего профиля, находясь с ним в механическом контакте. При этом необходимо проводить непрерывные измерения и обработку результатов. Таким образом, может осуществляться контроль прямолинейности и плоскостности различных изделий точного машиностроения и станкостроения.

## ВЫВОДЫ

Рассмотренный АОПЛС позволяет реализовать принцип пассивной акустической локации для измерения дистанции, пройденной ультразвуковой волной, путем акустического зондирования референтного светового пучка при акустооптическом взаимодействии. При этом проявляются следующие свойства:

- измерение производится без затемнения и искажения волнового фронта референтного светового пучка;

- возможна полная автоматизация измерений при отсутствии механических операций;

- время на одно измерение может быть доведено до 1 мс и менее;

- погрешность измерений составляет единицы микрон и может быть уменьшена;

- динамический диапазон измеряемых смещений составляет величину порядка нескольких десятков миллиметров.

Рассмотренный АОПЛС пригоден для решения различных геодезических задач высокоточного быстродействующего автоматизированного контроля прямолинейности, плоскостности и других геометрических параметров, а также контроля деформаций самых разнообразных инженерно-технических объектов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. с. 1191732 СССР. Устройство для контроля угловых перемещений/А. Н. Дрожжин.— Оpubл. 15.11.85, Бюл. № 42.
2. А. с. 721677 СССР. Фотоэлектрическое устройство для измерения/М. А. Кокшаров, В. А. Козлачков.— Оpubл. 15.03.80, Бюл. № 10.
3. Пат. 4474467 США. Устройство определения фронта волны/John W. Hardy, Lexington, Jeffrey H. Everson.— Оpubл. 28.12.81.
4. Балахний В. И., Парыгин В. Н., Чирков А. Е. Физические основы акустооптики.— М.: Радио и связь, 1985.
5. Ванюшев Б. В., Орлов Е. М., Тарков В. А. Устройство автоподстройки луча // Автометрия.— 1984.— № 3.

*Поступила в редакцию 25 марта 1988 г.*

УДК 535.317

А. Н. ГРИШАНОВ, Л. П. ГУРЬЕВ, А. С. ПОТКИН, В. А. ХАНДОГИН  
(Новосибирск)

### ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ ПРИ ПОДВИЖНОЙ РЕГИСТРИРУЮЩЕЙ СРЕДЕ

Как известно [1, 2], на начальном этапе развития и применения методов голографической интерферометрии считалось, что одно из основных условий хорошего качества голограмм и интерферограмм — пространственная стабильность опико-механической схемы интерферометра. Однако изобретение и последующее бурное и успешное развитие методов, использующих контролируемый фазовый сдвиг, в значительной степени изменили смысл указанного условия. Было эффектно продемонстрировано преимущество регулярных деформаций интерферометра, которые привели к существенным усовершенствованиям методов (отметим одну из последних публикаций [3]).

С другой стороны, настойчивое стремление исследователей к освоению обширных потенциальных возможностей голографической интерферометрии привело к предельному изопрению методики и техники экспериментов. В результате объектами современных исследований становятся, например, собственные формы колебаний с энергией до нескольких (или даже до нескольких десятков) ватт или образцы, которые между экспозициями удаляются из голографического интерферометра иногда на очень длительные периоды времени.

Таким образом, в современных экспериментах, как правило, не удается сохранить точную, оптическую стабильность интерферометра, либо она намеренно нарушается. Учитывая изложенное, рассмотрим влияние пространственных перемещений регистрирующей среды между или во время экспозиций на голографическую интерференцию. Для сокращения выкладок используем модель тонкой плоской голограммы. В силу своей простоты она позволяет отразить лишь наиболее существенные эффекты, игнорируя второстепенные детали [2].

**Двухэкспозиционная интерферометрия.** Пусть между экспозициями смещаются как исследуемый объект, так и ре-

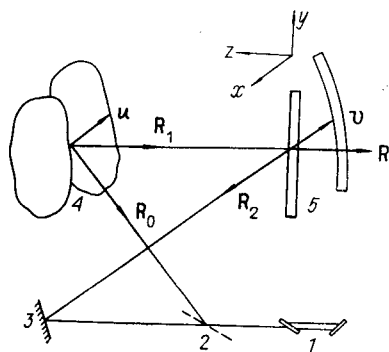


Рис. 1. Условная оптическая схема голографического интерферометра:

1 — ОКГ; 2 — светоделитель; 3 — зеркало; 4, 5 — подвижные объект и фотопластинка соответственно