

И. С. ДЕГТЯРЕВ, Г. А. ЛЕНКОВА, А. И. ЛОХМАТОВ

(Новосибирск)

## УГЛОВОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР ДЛЯ ЛАЗЕРНЫХ СКАНИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ

**Введение.** Качество изображения, создаваемого лазерными сканирующими устройствами, существенным образом зависит от точности координатной привязки углового положения лазерного пучка света [1—3]. Когда развертка производится с помощью плоского зеркала, для обеспечения высокой точности привязки применяют интерференционные методы. Интерферометры обычно выполняются по дифференциальной схеме: плечи располагаются параллельно друг другу, а отражатели в виде уголкового призм жестко закрепляются на зеркале симметрично оси вращения. При повороте зеркала отражатели перемещаются относительно друг друга в противоположных направлениях, что приводит к изменению разности хода интерферирующих лучей. Анализ оптических схем известных угловых интерферометров с параллельным расположением плеч дан в [4, 5].

**Интерферометр.** В предлагаемой работе рассматриваются особенности и результаты применения углового интерферометра с непараллельным расположением плеч, в котором светоделительный блок выполнен в виде двоякопреломляющей призмы. Интерферометр имеет минимальное число оптических деталей и отличается высокой стабильностью в работе. За счет использования для разделения световых пучков поляризационной призмы исключается необходимость в нанесении светоделительных покрытий. Небольшие повороты призмы вблизи положения наименьшего отклонения, которое является рабочим, не вносят существенных изменений в параметры схемы.

На рис. 1, а показана схема интерферометра. Луч света He-Ne-лазера 1 падает на грань поляризационной призмы 2 и, преломляясь в ней, разделяется на обыкновенный и необыкновенный лучи со взаимно перпендикулярными направлениями поляризации. Показатель преломления для первого из них имеет постоянное значение  $n_o$ , для второго —  $n_e$  (изменяется от минимального  $n_e$  до максимального  $n_o$  в зависимости от

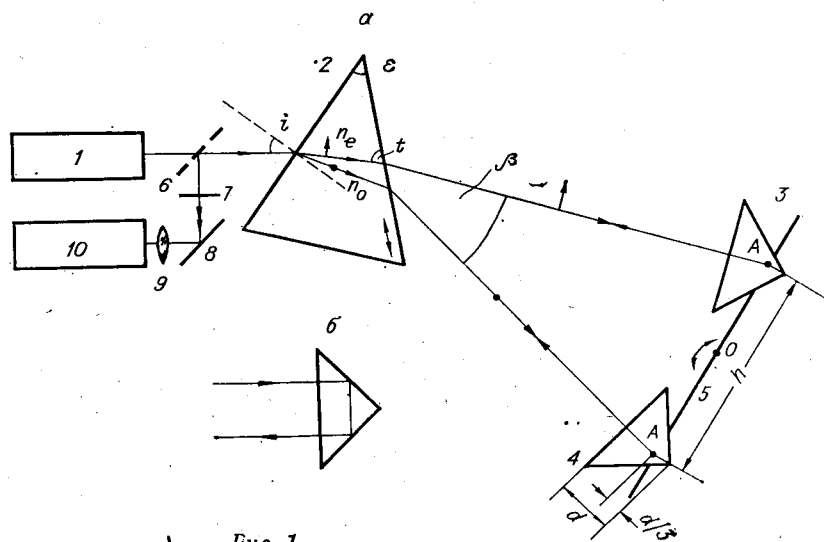


Рис. 1

угла  $t$  между лучом и оптической осью кристалла):

$$n'_e = \sqrt{n_0^2 - (n_0^2 - n_e^2) \sin^2 t}. \quad (1)$$

Лучи направляются к уголковым призмам 3 и 4, связанным со сканирующим опорным зеркалом 5, и после отражения от них совмещаются на выходе из призмы 2.

Перемещение интерференционных полос регистрируется фотоприемником 10. На пути выходных лучей, которые идут ниже входных, установлены поворотные зеркала 6, 8 и поляризатор 7. Ход лучей показан на вертикальном сечении схемы (рис. 1, б) для одного из отражателей. Для наблюдения контрастных полос направление поляризации излучения лазера 1 и оптическая ось поляризатора 7 ориентируются под углом  $45^\circ$  к направлениям поляризации обыкновенного и необыкновенного лучей. При повороте призмы на  $\pm 1^\circ$  угол между лучами изменяется на  $\pm 0,1^\circ$ .

Согласно [4, 5] рассматриваемую схему можно отнести к группе интерференционных схем, в которых количество отражений в плечах равно или отличается на четное число и при повороте опорного зеркала с отражателями выходные пучки взаимно смещаются в поперечном направлении. Смещение приводит к падению контраста полос, поэтому при выборе параметров схемы необходимо следить, чтобы оно лежало в допустимых пределах [5]. Можно показать, что контраст полос  $k$  в первом приближении связан с величиной взаимного смещения интерферирующих пучков  $a$  соотношением

$$k = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min}) = \sin \delta / \delta,$$

где  $\delta = 2\pi a / D$ ,  $D$  — диаметр пучка;  $I_{\max}$ ,  $I_{\min}$  — максимальное и минимальное значения интегральной интенсивности в поле интерференции. Например, при значениях  $a/D = 1/8$ ,  $3/16$  и  $1/4$  контраст полос составит соответственно  $\sim 90$ ,  $78$  и  $64\%$ .

Определим, как влияет непараллельность плеч интерферометра на изменение разности хода и взаимное поперечное смещение пучков на выходе. Предположим, что оптические центры призм А (рис. 1, 2) лежат в плоскости зеркала на линии, перпендикулярной оси его вращения 0. Оптический центр, как известно, находится на расстоянии  $d(n-1)/n$  от вершины призмы ( $d$  — высота,  $n$  — коэффициент преломления призмы). Если призма выполнена из стекла ( $n = 1,5$ ), то это расстояние равно  $1/3$  высоты призмы.

Для упрощения расчетов расчленим движение уголкового призмы, вызванное поворотом зеркала, на три составляющие: 1) смещение оптического центра А (в точки В и С для призм 1 и 2 на рис. 2, а); 2) поворот отражателя (без учета материала, из которого он выполнен) вокруг точки А (рис. 2, б); 3) наклон плоскопараллельной пластинки с толщиной  $d$ , равной высоте уголкового призмы (рис. 2, в). Естественно, что значения углов  $\alpha$  поворота зеркала относительно оси 0, призмы вокруг точки А и изменение угла падения светового пучка на плоскопараллельную пластину (т. е. призму) тождественно равны между собой.

Пусть входные грани уголкового призм (1, 2 на рис. 2, а) расположены перпендикулярно световым пучкам (на рисунке показаны лучи, проходящие через вершины призм). Определим изменение разности хода  $\Delta_1$  и взаимное смещение пучков  $a_1$ , вызванное смещением оптиче-

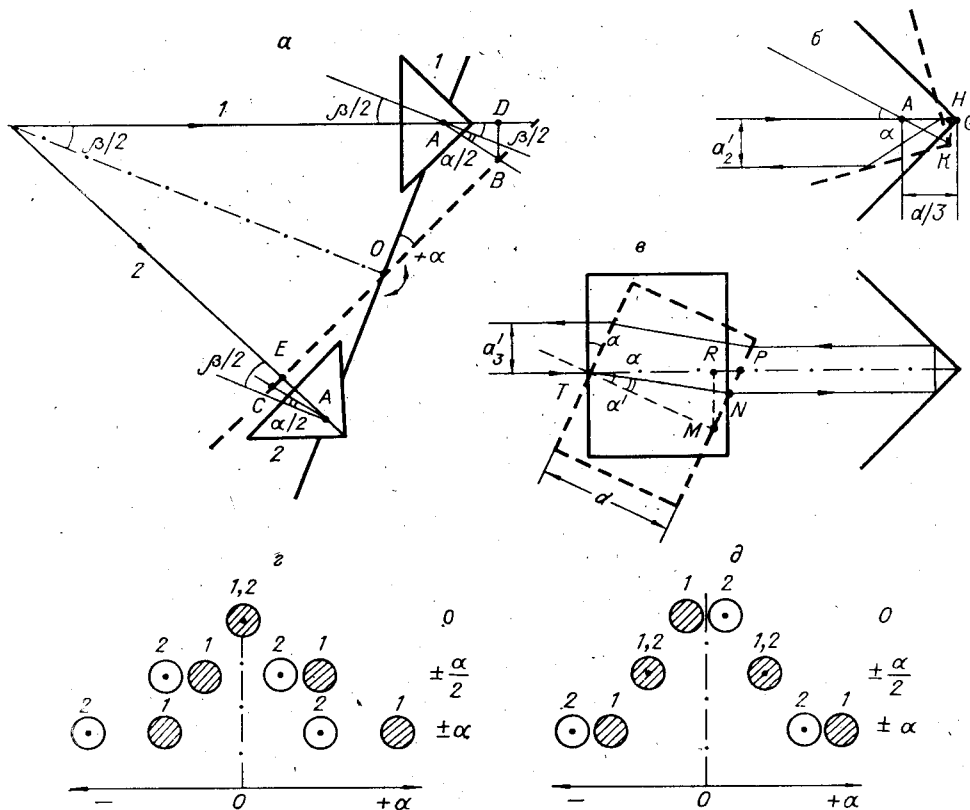


Рис. 2

ских центров (первая составляющая):

$$\Delta_1 = 2(AD + AE) = 2h \cos(\beta/2) \sin \alpha; \quad (2)$$

$$a_1 = 2(BD - EC) = 4h \cos(\beta/2) \sin^2(\alpha/2). \quad (3)$$

Здесь  $h$  — расстояние между центрами призм;  $\beta$  — угол между плечами интерферометра.

Выбор оптического центра (точка  $A$ ) для закрепления уголкового призмы обусловлен тем, что поворот вокруг нее на малый угол  $\alpha$  не приводит в первом приближении к изменению разности хода и смещению лучей. Другими словами, происходит компенсация действия второй и третьей составляющих. Из рис. 2, б, в определим изменение длины хода  $\Delta'$  и смещение  $a'$  выходных лучей, вызываемые этими составляющими в каждом из плеч интерферометра:

$$\Delta_2' = -2HG = -(4d/3) \sin^2(\alpha/2); \quad (4)$$

$$\Delta_3' = 2[TNn - TR - d(n-1)] = [d(n-1)/n] \sin^2 \alpha = (d/3) \sin^2 \alpha; \quad (5)$$

$$a_2' = 2HK = (2d/3) \sin \alpha; \quad (6)$$

$$a_3' = -2(MP - MN) \cos \alpha = -2d(\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \alpha') \cos \alpha, \quad (7)$$

где  $n$  — показатель преломления материала, из которого сделана уголкового призмы;  $\alpha'$  — угол преломления. Индекс обозначает отношение к соответствующей составляющей. Знак минус в  $\Delta_2'$  и  $a_3'$  показывает, что указанные значения противоположны  $\Delta_3'$  и  $a_2'$ . Последний член равенства (5) соответствует  $n = 1,5$ .

Из (4) — (7) следует, что нескомпенсированное суммарное изменение длины хода и смещение лучей в каждом из плеч равно (при

$n = 1,5$ )

$$\Delta_2' + \Delta_3' = -(4d/3) \sin^4(\alpha/2) \simeq \simeq -d\alpha^4/12; \quad (8)$$

$$a_2' + a_3' \simeq -10d\alpha^3/27 \quad (9)$$

т. е. на два порядка (относительно  $\alpha$ ) меньше, чем для каждой из составляющих в отдельности (4)–(7). Следовательно, для малых углов влияние поворота призмы вокруг центра (вторая и третья составляющие) может не учитываться.

Отметим, что для схемы на рис. 2, а действие второй и третьей составляющих проявляется в обоих плечах аналогично. Поэтому если высоты призм равны, то вследствие дифференциального принципа работы интерферометра остаточное влияние составляющих взаимно компенсируется даже при больших значениях угла  $\alpha$ . Анализ действия угловых призм при разных высотах дан в [6].

Таким образом, на взаимное смещение и изменение разности хода интерферирующих лучей в схеме рис. 2, а влияет только первая составляющая. Сравнение (2) и (3) с соответствующими формулами для интерферометров с параллельными плечами [4, 5] показывает, что непараллельность плеч приводит к появлению постоянного члена  $\cos(\beta/2)$ , который равносильен уменьшению расстояния  $h$  между оптическими центрами призм.

В рассматриваемой схеме (см. рис. 2, а) при наклоне зеркала на угол  $\alpha$  оптические центры призм 1 и 2 смещаются относительно направлений соответственных лучей 1 и 2 на неравные величины  $BD$  и  $EC$ :

$$BD = AB \sin[(\beta + \alpha)/2] = h \sin(\alpha/2) \sin[(\beta + \alpha)/2];$$

$$EC = AC \sin[(\beta - \alpha)/2] = h \sin(\alpha/2) \sin[(\beta - \alpha)/2].$$

При изменении знака наклона зеркала аналитические выражения величин смещения меняются местами. Аналогично наклон зеркала отражается на смещении выходных лучей. В первом случае 1-й пучок смещается на  $2BD$ , 2-й — на  $2EC$ , а во втором — 1-й пучок смещается на величину 2-го, и наоборот. На рис. 2, г показана динамика смещения пучков. Для уменьшения падения контраста пучки, находящиеся в начальном положении, можно развести (путем увеличения расстояния до зеркала) примерно на половину величины их смещения в крайних точках. Тогда пучки будут совпадать вблизи положения зеркала, наклоненного на  $\pm\alpha/2$ , и затем снова расходятся при дальнейшем наклоне зеркала (рис. 2, д), но уже значительно меньше, чем в первоначальном случае (рис. 2, г). На рис. 2, г, д смещение пучков для наглядности увеличено, в действительности они частично перекрываются.

Если расположить входные грани призм параллельно поверхности зеркала, а следовательно, параллельно плоскости, содержащей оптические центры (рис. 3), то по отношению к входящим лучам они будут повернуты в противоположные стороны (угол падения  $\pm\beta/2$ ). В этом случае наблюдается более сложная зависимость характеристик интерферометра от углов  $\alpha$  и  $\beta$ . При обозначениях, введенных на рис. 3, и  $n = 1,5$  выражения для изменения длины пути луча в первом  $\Delta_2$  и во втором  $\Delta_2''$  плечах интерферометра при повороте призм вокруг оптических центров (вторая составляющая) на угол  $\alpha$  отличаются и имеют вид

$$\begin{aligned} \Delta_2'; \Delta_2'' &= -(4d/3) \{ \sin^2[\pm(\beta/4) + (\alpha/2)] - \sin^2(\beta/4) \} = \\ &= -(4d/3) \sin[(\pm\beta + \alpha)/2] \sin(\alpha/2). \end{aligned}$$

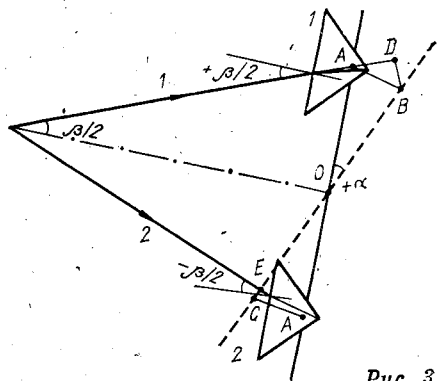


Рис. 3

Знаки плюс и минус относятся соответственно к  $\Delta_2'$  и  $\Delta_2''$ . Отсюда разность хода лучей

$$\Delta_2 = \Delta_2' - \Delta_2'' = - (4d/3) \sin(\beta/2) \sin \alpha \simeq -2d\alpha\beta/3. \quad (10)$$

Запишем аналогичные выражения для третьей составляющей:

$$\begin{aligned} \Delta_3; \Delta_3'' &= (d/3) \{ \sin^2 [\pm(\beta/2) + \alpha] - \sin^2(\beta/2) \} = (d/3) \sin(\pm\beta + \alpha) \sin \alpha; \\ \Delta_3 &= \Delta_3' - \Delta_3'' = (d/3) \sin \beta \sin 2\alpha \simeq 2d\alpha\beta/3. \end{aligned} \quad (11)$$

Следовательно, вторая и третья составляющие вносят дополнительную разность хода даже при одинаковой высоте призмы:

$$\begin{aligned} \Delta_2 + \Delta_3 &= (4d/3) \sin \alpha \sin(\beta/2) [1 - \cos \alpha \cos(\beta/2)] \simeq \\ &\simeq (2d/3) \beta \alpha [(\alpha^2/2) + (\beta^2/8) - (\alpha^2\beta^2/16)]. \end{aligned} \quad (12)$$

Так как разность хода (12) зависит от высоты призмы  $d$ , которая обычно значительно меньше расстояния между призмами  $h$ , и от углов  $\alpha$  и  $\beta$  в сумме в четвертой степени, то она достаточно мала по сравнению с (1) и должна приниматься во внимание только при больших значениях  $\alpha$  и  $\beta$ . Аналитическое выражение нескомпенсированного взаимного смещения пучков  $a_2 + a_3$  для этого случая не приводится, поскольку оно значительно меньше, чем  $a_1$  (см. (3)), и практически не влияет на контраст полос.

**Экспериментальная часть.** Испытание интерферометра проводилось в составе лазерного регистратора изображений [3]. Излучение He-Ne-лазера фокусировалось объективом, расположенным до сканирующего зеркала, на пленку. При повороте зеркала сфокусированное пятно разворачивалось по кривой, радиус кривизны  $f$  которой равен расстоянию от зеркала до пленки. Кассета изготавливалась с тем же радиусом кривизны.

Поляризационная призма интерферометра 2 (см. рис. 1) выполнялась из исландского шпата ( $n_o = 1,658$ ;  $n_e = 1,486$ ) и имела преломляющий угол  $\epsilon = 45^\circ$ . В положении минимального отклонения лучей максимальный угол  $\beta$  между лучами, выходящими из призмы, наблюдался при  $n_e = n_e$ , т. е. когда оптическая ось кристалла перпендикулярна плоскости падения ( $t = 90^\circ$ ). В данном случае  $n_{cp} = 1,572$ , угол падения  $i = 37^\circ$ ,  $\beta \simeq 9,5^\circ$ . Если ось кристалла параллельна плоскости падения (см. рис. 1), то для этого же угла падения в лучшем случае, когда ось параллельна выходной грани,  $\beta = 8,2^\circ$  и  $t = 68,5^\circ$ . Для увеличения угла между лучами угол падения уменьшался на несколько градусов.

Уголкового отражатели 3, 4 располагались в нижней части сканирующего зеркала 5 на расстоянии 15 мм от оси вращения ( $h = 30$  мм). Изменение разности хода, возникающее при повороте зеркала, регистрировалось фотоприемником 10 (9 — линза). Каждый импульс фототока соответствовал изменению разности хода на длину волны лазера ( $\lambda = 0,633$  мкм). Счет полос был однонаправленным. Сигнал «начало отсчета» формировался с помощью фотоприемников, установленных по краям кассеты.

Запись информации проводилась на фотопленку шириной 210 мм. При  $f = 760$  мм это соответствовало повороту зеркала с уголковыми отражателями на угол  $\pm\alpha = 4^\circ$ . Взаимное смещение выходных лучей составляло 0,15 мм, т. е.  $a_1 = \pm 0,075$  мм, если в начальном положении лучи разводились на половину общего смещения. Как показано выше, для сохранения в крайних положениях зеркала контраста полос на уровне 90% необходимо, чтобы диаметр пучка превышал величину смещения не менее чем в 8 раз. В нашем случае диаметр лазерного пучка на уровне падения интенсивности в  $e^2$  раз составлял 0,8 мм, что близко к указанному требованию, так как  $8a_1 = 0,6$  мм.

Для проверки точности координатной развертки на пленке записывались точки через постоянное дискретное число импульсов фототока,

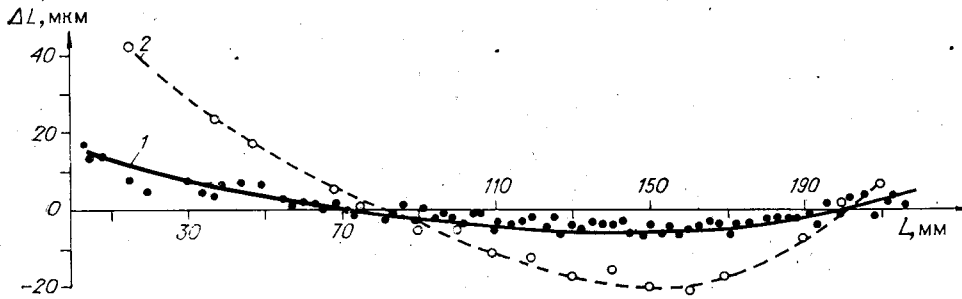


Рис. 4

поступающих от интерферометра. Затем расстояния между точками измерялись с помощью микроскопа. Полученные графики представлены на рис. 4, 5. Интервалы между точками соответствовали изменению разности хода на 16 длин волн, на пленке они имели значения от 255 до 261 мкм в зависимости от расстояния до центра кадра.

На рис. 4 приведены отклонения от среднего значения интервалов из 11 и 41 точек в пределах записи на длине 217 мм. Среднее значение интервалов 2581 и 10322 мкм. Интервалы имеют минимальные значения в области 150 мм. Последнее можно объяснить трудностями точной юстировки, приводившими к несовпадению положений зеркала, при которых наблюдается нулевая разность хода в интерферометре и лазерный луч находится в центре плоскости развертки. При анализе результатов измерения точка 150 мм принималась за начало координат.

В первом приближении между смещением пятна  $L$  и показанием интерферометра  $\Delta_1$  должна наблюдаться линейная зависимость, т. е.  $L \approx 2f \sin \alpha = f\Delta_1 / (h \cos \beta/2)$ . Если значение интервала вблизи точки 150 мм, равное 10,303 мм ( $\Delta \alpha \approx 23'$ ), принять за номинальное и последовательно суммировать, то полученные значения перемещений можно считать соответствующими такой зависимости. На рис. 5 показано отклонение измеренных отрезков от значений, вычисленных в результате суммирования (кривая 1). На длине 150 мм оно не превышает 0,35 мм ( $\sim 0,23\%$ ), что свидетельствует о высокой точности позиционирования даже без введения поправок.

В действительности изменение разности хода  $\Delta_1$  в интерферометре пропорционально  $\sin \alpha$  (см. (2)), а смещение пятна  $-\alpha$ . Если это учесть, то несоответствие измеренного значения расчетному уменьшится до 0,12 мм ( $\sim 0,1\%$ ) (см. кривую 2 на рис. 5). Расчетное значение смещения  $L$  сканирующего пятна на изогнутом экране определялось по формуле

$$L = 2\alpha f, \quad (13)$$

где  $f$  — расстояние от зеркала до пленки;  $\alpha = \arcsin(\Delta_1/2h)$  (см. (2)). Угол  $\alpha$  вычислялся исходя из числа интерференционных полос  $k$  (через

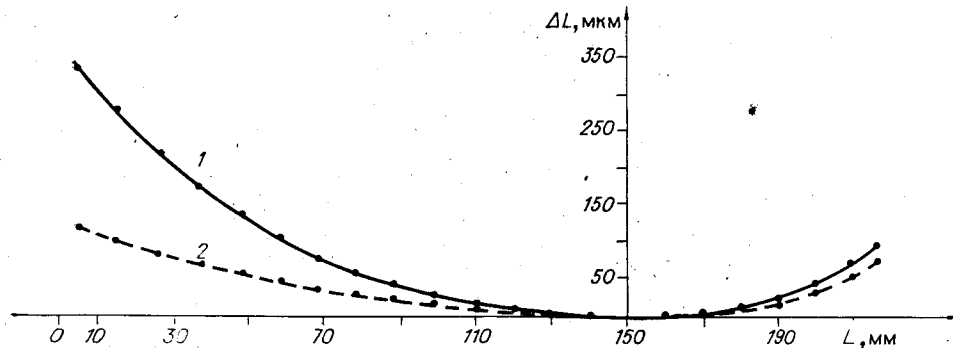


Рис. 5

которое регистрировались точки), связанного с разностью хода  $\Delta_1$  соотношением  $\Delta_1 = k\lambda$ .

При необходимости можно выразить зависимость  $L$  от показаний интерферометра в виде кусочно-непрерывной функции, на каждом участке которой сохраняется линейность, и ввести поправочные коэффициенты в электронную систему управления сканером. В таком случае погрешность регистрируемого изображения не будет превышать значений, приведенных на рис. 5 (кривая 2).

**Заключение.** Испытания показали, что предложенная схема углового интерферометра проста и стабильна в настройке, надежно работает в пределах угла развертки  $\pm 4^\circ$  с чувствительностью  $0,27''$  (52 700 адресуемых позиций). Качество полученных тестовых изображений было достаточно высоким. Пределы угловых поворотов могут быть увеличены до  $\pm 15^\circ$  путем расширения входного лазерного пучка и уменьшения расстояния  $h$  между уголковыми отражателями, а также за счет области с контрастом полос ниже 90%.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Урбах Дж. К., Фишли Т. Ш., Старкуэдер Г. К. Лазерные сканеры для электронных печатающих устройств // ТИИЭР.— 1982.— Т. 70, № 6.
2. Измерительные сканирующие приборы/Под ред. В. С. Розова.— М.: Машиностроение, 1980.
3. Бессмельцев В. П., Бурнашов В. Н., Вертопрахова Л. С. и др. Высокоразрешающий лазерный сканер с интерферометрическим контролем // Автометрия.— 1983.— № 2.
4. Ленкова Г. А. Анализ и сравнение угловых сканирующих интерферометров // Автометрия.— 1981.— № 1.
5. Lenkova G. A. Angular interferometers for laser scanners // Optik.— 1984.— Bd 67, N 3.— S. 211—221.
6. Бондаренко И. Д. Анализ действия уголкового отражателя в интерференционных угломерах // Метрология.— 1984.— № 5.

*Поступила в редакцию 17 апреля 1986 г.*

УДК 681.332 : 535.317.2

**Н. И. ДМИТРИЕВ, С. Г. КАЛЕНКОВ, Г. И. СОЛОМАХО**

*(Москва)*

### **РЕГИСТРАЦИЯ И СИНТЕЗ ГОЛОГРАММ ОРТОГОНАЛЬНЫМИ ТРАНСПАРАНТАМИ**

Голографическая запись — это процесс регистрации интенсивности интерференционной картины полей предметной и опорной волн. Среду для записи голограммы можно рассматривать как набор детекторов излучения, расположенных в пространстве регистрации голограммы. Как известно, качество записи в значительной мере определяется свойствами среды (чувствительность, разрешающая способность и т. п.).

В настоящей работе рассматривается в известной мере альтернативный способ регистрации и последующего синтеза голограмм. Отличительная особенность предлагаемого способа состоит в том, что для записи (регистрации) голограммы необходим только один «точечный» детектор и набор транспарантов определенного вида.

Процесс регистрации голограммы сводится к тому, что в некоторой фиксированной точке детектором регистрируют интенсивность волнового поля, дифрагированного на каждом транспаранте из этого набора. Иными словами, транспаранты последовательно один за другим «подставляют» перед детектором, который регистрирует величины интенсивности