

Г. А. ЛЕНКОВА  
(Новосибирск)

## АНАЛИЗ И СРАВНЕНИЕ УГЛОВЫХ СКАНИРУЮЩИХ ИНТЕРФЕРОМЕТРОВ

При создании лазерных устройств ввода-вывода информации из ЭВМ (дисплеев, графопостроителей, регистраторов) возникает необходимость в точном измерении угла развертки луча в пределах нескольких градусов. Развертка может осуществляться с помощью механического (колеблющееся зеркало), акустооптического или электрооптического дефлектора [1]. Первое из этих устройств позволяет применить для отсчета угла наиболее точный интерференционный метод измерения. Интерферометр выполняется обычно по дифференциальной схеме: плечи располагаются параллельно друг другу, а отражатели в виде уголкового призм [2] жестко закрепляются на сканирующем зеркале симметрично оси вращения. При повороте зеркала отражатели перемещаются в противоположных направлениях и изменяется разность хода интерферирующих лучей. Результат измерения зависит только от угла поворота и расстояния между вершинами отражателей. Для измерения углов развертки применим также дифференциальный интерферометр с плоскими отражателями [3], в качестве которых может служить обратная сторона сканирующего зеркала.

Цель статьи — провести сравнительный анализ оптических схем угловых сканирующих интерферометров с плоскими и уголковыми отражателями и дать оценку их метрологических возможностей.

Известные оптические схемы для измерения углов поворота можно разделить на две группы в зависимости от того, какие лучи интерферируют: соответственные (происходящие из одного первичного луча) или несоответственные. Рассмотрим первую группу схем на примере интерферометра с призмой Кестерса (рис. 1, а). Эта призма состоит из двух одинаковых прямоугольных призм, склеенных катетными поверхностями, на одну из которых нанесен полупрозрачный слой. Призма обеспечивает постоянство юстировки оптической схемы, но трудна в изготовлении. Она может быть заменена любой комбинацией зеркал 1, 2 и светоделительных элементов 3, которые обеспечивают симметрию хода световых пучков относительно оси вращения сканирующего зеркала. На рис. 1, а показан ход интерферирующих лучей 1 и 2 при начальном неотклоненном положении измерительного зеркала  $M_0$ .

Для упрощения расчета разности хода лучей оптическая схема интерферометра заменяется эквивалентной: интерферометр представляется в виде двух зеркал, являющихся изображениями измерительного зеркала в плечах интерферометра. На рис. 1, б представлены эквивалентная схема и ход лучей для случая, когда зеркало наклонено на угол  $\alpha$  ( $M$  на рис. 1, а):  $M_{1,3}$  — изображение отклоненного зеркала  $M$  в первом плече интерферометра, построенное как отражение в зеркале 1 и светоделителе 3;  $M_2$  — изображение  $M$  во втором плече как отражение в зеркале 2 (индексы указывают последовательность изображения в соответствующих зеркалах). Из рассмотрения схемы легко определить разность хода  $\Delta$  между 1-м и 2-м лучами, интерферирующими в плоскости первоначального положения зеркала, и измеряемое перемещение  $l = \Delta/2$ . Если при вращении против часовой стрелки угол  $\alpha$  считать положительным, то изменение разности хода относительно нулевого положения ( $\alpha = 0$ ) составит

$$\Delta - \Delta_0 = 2l = AC + BC + AB = h \operatorname{tg} 2\alpha, \quad (1)$$

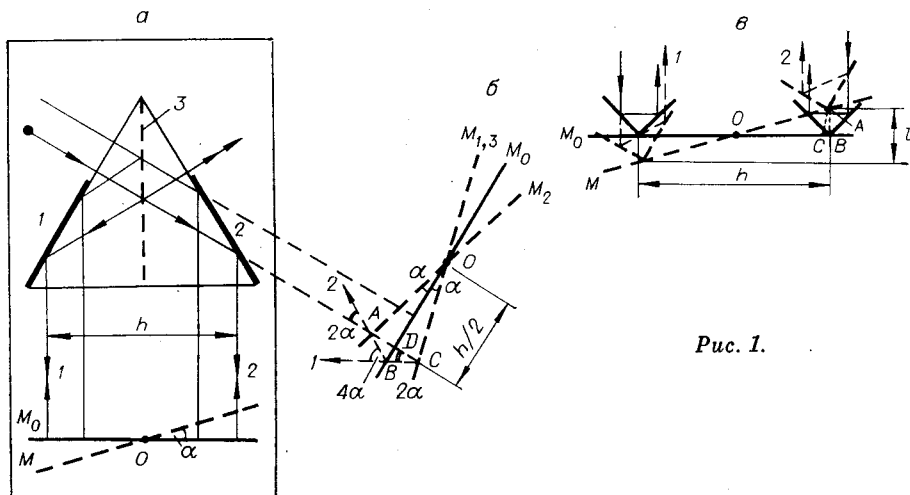


Рис. 1.

а ширина полос  $b = \lambda / \operatorname{tg} 4\alpha$ , где  $\lambda$  — длина волны света,  $h$  — расстояние между 1-м и 2-м падающими лучами. Расхождение световых пучков в плоскости локализации  $M_0$  равно нулю. При фотоэлектрической регистрации эта плоскость проецируется на фотоприемник, так как в любой другой плоскости наблюдается взаимное поперечное смещение световых пучков, приводящее к падению контраста интерференционных полос.

Дифференциальные интерферометры этой группы допускают применение источников света с низкой пространственной и временной когерентностью, например полупроводниковых лазеров. Первое обусловлено совпадением хода освещающих и интерферирующих пучков, второе — начальной нулевой разностью хода и незначительным ее изменением. Существенный недостаток схемы в том, что чувствительность интерферометра зависит от положения точки регистрации относительно оси освещающего пучка, поскольку в этом случае изменяется расстояние  $h$  между соответственными лучами (1-м и 2-м), падающими на зеркало. Кроме того, ширина полос непостоянна и связана с углом наклона зеркала. Например, при угловых поворотах в пределах  $0-4^\circ$  она изменяется от бесконечности до  $\sim 2$  мкм. Понятно, что при автоматической регистрации полос необходимо перед фотоприемником устанавливать очень узкую щель, а это приводит к резкому снижению отношения сигнал/шум.

Если в рассматриваемой схеме плоское зеркало заменить уголковыми отражателями (см. рис. 1, в), вершины которых жестко закреплены относительно друг друга на расстоянии  $h$ , то ширина полос станет бесконечной и независимой от угла наклона, а чувствительность интерферометра — постоянной в любой точке регистрации. В этой схеме между изменением разности хода интерферирующих лучей и углом поворота зеркала наблюдается зависимость

$$\Delta - \Delta_0 = 2l = 4AC = 2h \sin \alpha, \quad (2)$$

где  $AC$  — составляющая смещения вершины отражателя, параллельная оптической оси;  $AC$  перпендикулярно  $OB$ , а  $OB = OA$ . Смещение освещающих и интерферирующих пучков при любых положениях плоскости регистрации равно нулю.

Вторая группа схем с несоответственными интерферирующими лучами в отличие от первой имеет несимметричный ход лучей относительно оси вращения зеркала. На рис. 2, а показана схема наиболее простого интерферометра этой группы. Ход освещающих (штриховая линия) и интерферирующих (сплошная линия) лучей (см. эквивалентные схемы

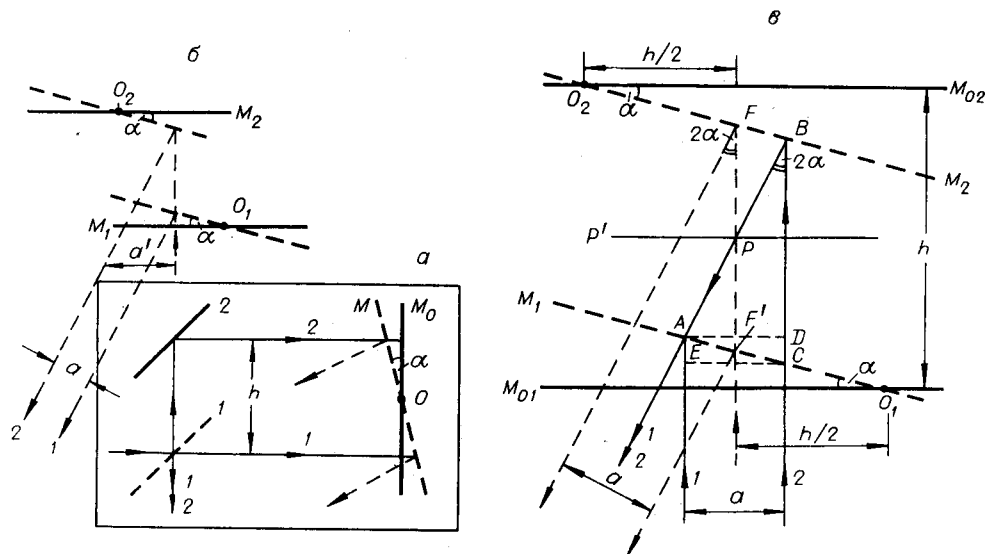


Рис. 2.

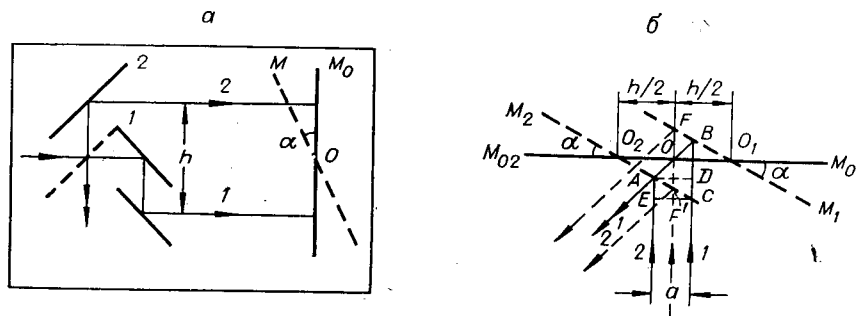


Рис. 3.

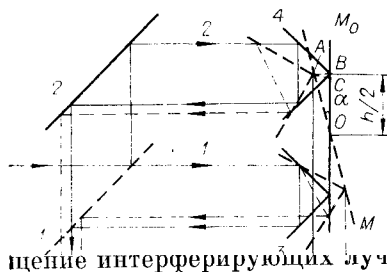
соответственно на рис. 2, б и в) не совпадает. Из рис. 2, в находим значения разности хода  $\Delta$  и взаимное смещение на входе  $a$  1-го и 2-го интерферирующих лучей:

$$\begin{aligned} \Delta &= AE - (AB + BC) = -2h \cos^2 \alpha + h \sin 2\alpha, \\ a &= AB \sin 2\alpha = h(1 - \operatorname{tg} \alpha) \sin 2\alpha = h \sin 2\alpha - 2h \sin^2 \alpha. \end{aligned} \quad (3)$$

Взаимное смещение выходных освещающих пучков также определяется формулой (3), а общее смещение  $a'$  зависит от расстояния плоскости регистрации до измерительного зеркала. Если на фотоприемник переносятся плоскость  $P'$ , расположенная в середине между изображениями неотклоненного зеркала  $M$  в плечах интерферометра  $M_{02}$  и  $M_{01}$ , то общее смещение равно нулю. Изменение разности хода  $(\Delta - \Delta_0)$  и линейное перемещение  $l$  относительно положения  $\alpha = 0$  связано с углом поворота соотношением

$$\Delta - \Delta_0 = 2l = h \sin 2\alpha + 2h \sin^2 \alpha. \quad (4)$$

Достоинство схем второй группы состоит в том, что направления интерферирующих лучей совпадают, т. е. полосы имеют бесконечную ширину. Чувствительность интерферометра сохраняется постоянной в пределах освещающего пучка. Однако из-за начальной разности хода, равной удвоенному расстоянию между зеркалами 1 и 2, усложняется зависимость между величиной перемещения  $l$  и углом поворота  $\alpha$ . По этой



же причине схема может работать только с высокомонохроматическими источниками света.

Эти недостатки можно устранить, если с помощью подходящей комбинации зеркал (см., например, рис. 3) скомпенсировать начальную разность хода. Тогда изменение разности хода и линейное перемещение относительно положения  $\alpha = 0$

$$a = AD = FF' \sin 2\alpha = 2h \sin^2 \alpha \quad (6)$$

значительно уменьшается по сравнению с предыдущей схемой (ср. с формулой (3)). Например, для  $\alpha = 4^\circ$  смещение в 10 раз меньше.

Если плоское зеркало заменить угловыми отражателями 3, 4 (рис. 4), то аналитическое выражение разности хода между 1-м и 2-м интерферирующими лучами будет иметь вид

$$\Delta = -2h + 4AC = 2h(\sin \alpha - 1),$$

где  $AC$  имеет такое же значение, как на рис. 1, в. Измеряемое перемещение в этой схеме связано с углом поворота соотношением, аналогичным (2). Взаимное смещение интерферирующих лучей пропорционально смещению вершины отражателя  $BC$  перпендикулярно оптической оси и составляет

$$a = 4BC = 4h \sin^2 (\alpha/2), \quad (7)$$

а общее смещение независимо от положения плоскости регистрации равно нулю.

Следует отметить, что во всех схемах с плоским измерительным зеркалом обратный ход лучей под углом  $2\alpha$  к падающему приводит к необходимости использования оптических деталей с большой апертурой, особенно при удаленном положении измерительного зеркала и больших углах наклона. Путем усложнения схемы можно построить автоколлимационный ход лучей, но тогда возникает сложная аналитическая зависимость между углом поворота и разностью хода интерферирующих лучей. Кроме того, чувствительность будет зависеть от расстояния интерферометра до зеркала. Вторым недостатком схем с плоским зеркалом в том, что при положениях  $\alpha = 0$  свет возвращается частично в источник. Последнее явление нежелательно при работе с лазером, так как оно вызывает модуляцию мощности излучения.

В отличие от схемы с угловыми отражателями (см. рис. 1, в), где  $h$  — расстояние между вершинами призм, расположенных на измеряемом объекте, в схемах с плоским зеркалом (см. рис. 3) коэффициент  $h$  связан с расположением оптических деталей интерферометра. Поэтому на выбор схемы может также влиять стабильность температурных условий, в которых находится объект.

Рассмотрим связь между разверткой луча и показанием интерферометра. Величина смещения  $L$  светового пятна на экране, расположенном на расстоянии  $f$  от сканирующего зеркала, составляет  $L = f \operatorname{tg} 2\alpha$ , если экран плоский, или  $L = 2f\alpha$ , если экран имеет радиус кривизны, равный  $f$ .

Когда угол поворота  $\alpha$  мал, то для всех схем сканирующих интерферометров в первом приближении  $l = h\alpha$ . При таком соотношении в

случае изогнутого экрана между показанием интерферометра и величиной смещения светового пятна существует линейная зависимость

$$L = (2f/h)l, \quad (8)$$

которая удобна для автоматизации процесса сканирования.

Если точная зависимость между  $l$  и  $\alpha$  [(1), (2), (4) и (5)] при значительных углах развертки не учитывается, то возникает относительная погрешность смещения пятна на изогнутом экране:

$$\Delta L/L = [(tg 2\alpha)/2\alpha] - 1, \quad (1a)$$

$$\Delta L/L = [(\sin \alpha)/\alpha] + 1, \quad (2a)$$

$$\Delta L/L = [(\sin 2\alpha + 2 \sin^2 \alpha)/2\alpha] - 1, \quad (4a)$$

$$\Delta L/L = [(\sin 2\alpha)/2\alpha] - 1. \quad (5a)$$

При сканировании светового пятна по плоскому экрану линейная зависимость реализуется только тогда, когда луч управляется с помощью интерферометра, построенного согласно рис. 1, а; так как смещение пятна в этом случае пропорционально  $tg 2\alpha$ . В остальных рассмотренных схемах при управлении разверткой луча на основе линейного соотношения (8) возникает относительная погрешность смещения пятна

$$\Delta L/L = [(2 \sin \alpha)/tg 2\alpha] - 1, \quad (2б)$$

$$\Delta L/L = [(\sin 2\alpha + 2 \sin^2 \alpha)/tg 2\alpha] - 1, \quad (4б)$$

$$\Delta L/L = [(\sin 2\alpha)/tg 2\alpha] - 1. \quad (5б)$$

На рис. 5 графически показано изменение погрешности смещения пятна при увеличении угла  $\alpha$  для случая изогнутого (штриховая линия) и плоского (сплошная) экранов.

Для сравнительной оценки интерферометров их принципиальные оптические схемы, а также приближенные формулы для расчета изменения разности хода  $\Delta - \Delta_0$ , смещения пучков  $a, a_1$  и угла сходимости интерферирующих лучей  $\omega$  сведены в таблицу. Последовательность расположения схем соответствует снижению метрологических характеристик. Выбор схемы в каждом конкретном случае зависит от интервала измерения, требуемой точности, источника света, формы экрана и т. д. Например, схе-

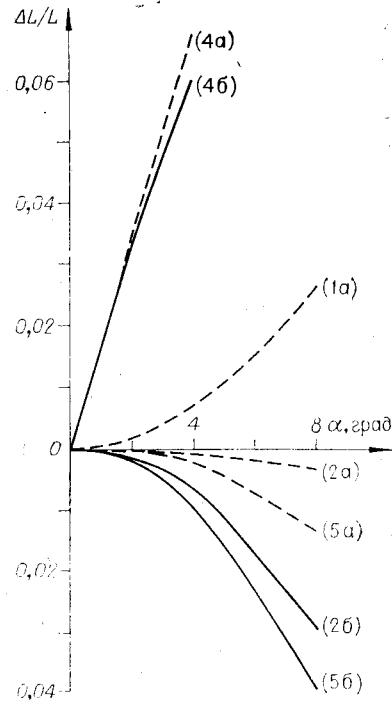


Рис. 5.

Оптическая схема					
Рис.	1, б	4	3	2	1, а
Расчетные формулы	(2)	(2); (7)	(5), (6)	(3), (4)	(1)
$\sim \Delta - \Delta_0; \sim 2l$	$2h\alpha$	$2h\alpha$	$2h\alpha$	$2h\alpha + 2h\alpha^2$	$2h\alpha$
$\sim a$	0	$h\alpha^2$	$2h\alpha^2$	$2h\alpha - 2h\alpha^2$	0
$\sim a_1$	$1,3d\alpha$	0	—	—	—
$\omega$	0	0	0	0	$4\alpha$

ма, показанная на рис. 1, а, может применяться для измерения углов в небольшом интервале  $(1 \div 5)'$ , так как с увеличением угла наклона уменьшается ширина полос. Из таблицы и графиков рис. 5 видно, что лучшими характеристиками обладает схема интерферометра, представленного на рис. 1, в.

В этой схеме отклонение от линейной зависимости при  $\alpha = 4-8^\circ$  составляет соответственно для изогнутого и плоского экранов 0,1—0,3 и 0,6—2,9% (см. графики 2а, 2б на рис. 5). Такое же отклонение наблюдается во второй схеме, изображенной на рис. 4, но по сравнению с предыдущей схемой здесь имеется поперечное пропорциональное  $\alpha^2$  смещение интерферирующих пучков, которое приводит к падению контраста интерференционных полос. В третьей схеме (см. рис. 3) отклонение от линейной зависимости в 1,5—4 раза больше (см. графики 5а, 5б на рис. 5), чем в двух первых, а смещение пучков в 2 раза больше, чем во второй схеме. Наиболее простая схема (см. рис. 2) имеет самые низкие характеристики. В ней нелинейность составляет 6,7—12,5 и 6,1—9,6% соответственно для изогнутого и плоского экранов, а смещение пучков пропорционально  $\alpha$ . Погрешность измерения может быть уменьшена, если зависимости (1), (2), (4) и (5) выразить в виде кусочно-непрерывных линейных функций и коэффициенты пропорциональности ввести в управляющее электронно-вычислительное устройство.

Если в схемах, представленных на рис. 1, в и 4, применяются не полые уголкового отражатели, для которых проводился расчет хода лучей, а призматические, то свойства схем изменяются. Разность хода и смещение лучей в полых отражателях зависят только от продольных и поперечных перемещений отражателей. В случае призматических отражателей на ход лучей влияет также их поворот, который равносильно повороту плоскопараллельной пластинки с толщиной, равно удвоенной высоте призмы. Очевидно, что при повороте призматических отражателей разность хода остается постоянной, так как пути интерферирующих лучей изменяются одинаково, а взаимное смещение лучей  $a_1$  зависит от схемы. В несимметричной схеме (см. рис. 4) лучи смещаются в одном направлении на  $2d \operatorname{tg}(\alpha/3)$  ( $d$  — высота призмы) и  $a_1$  равно нулю. Для симметричной схемы (см. рис. 1, в) взаимное поперечное смещение  $a_1$  лучей составляет  $4d \operatorname{tg}(\alpha/3)$ . Приравнивая смещение лучей в несимметричной схеме (см. рис. 4 и формулу (7)), вызванное поперечным перемещением отражателей при повороте сканирующего зеркала, и смещение лучей в симметричной схеме (см. рис. 1, в), вызванное поворотом призматических отражателей как пластинок, можно утверждать, что при

$$h = 4d/3\alpha \quad (9)$$

эти схемы равнозначны.

На практике расстояние между интерферирующими лучами  $h$  превосходит высоту призмы  $d$  не более чем в 5—10 раз. Следовательно, соотношение (9) выполняется при  $\alpha = 15-7^\circ$ . При углах поворота  $\alpha$  меньше этого значения  $a < a_1$ . Так как измеряемый угол обычно не превышает  $7^\circ$ , то практически всегда  $a < a_1$ . Таким образом, при работе с призматическими отражателями предпочтительнее оказывается схема с несимметричным ходом лучей (см. рис. 4), а с полыми — с симметричным ходом лучей (см. рис. 1, в).

В заключение автор выражает признательность В. П. Коронкевичу за обсуждение статьи и полезные замечания.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Zook D.— Appl. Opt., 1974, vol. 13, N 4, p. 875—887.
2. Выход В. Г. и др.— Измерительная техника, 1974, № 2, с. 11—13.
3. Stroke G.— J. Opt. Soc. Am., 1961, vol. 51, N 12, p. 1340—1341.

Поступила в редакцию 13 марта 1980 г.