

тогда  $I_k = (I_k, 1)$  и рекуррентная формула вычисления инвариантов (3) будет

$$I_{k+1} = k(I_k, I_1)/(k+1).$$

Аналогичная формула имеет место для инвариантов (4).

Такой метод отождествления точечных конфигураций обладает определенной устойчивостью к ошибкам измерения координат звезд в плоскости снимка.

Если комплексное число  $\varepsilon_j$  — ошибка измерения координат точки  $z_j$ , то  $I_p^e$  — инвариант искаженной конфигурации — стремится к  $I_p$  — инварианту точно измеренной конфигурации при  $|\varepsilon_j| \rightarrow 0$  (то же для (4)).

Легко выводится оценка, которая в этом убеждает:

$$|I_p^e - I_p| \leq A(p, R) \varepsilon,$$

где  $R$  — радиус точно измеренной конфигурации:

$$\varepsilon = \max_{j=1, t} |\varepsilon_j - \bar{\varepsilon}|, \quad \bar{\varepsilon} = \sum_{j=1}^t \varepsilon_j / t.$$

Таким образом, точность идентификации определяется ошибками измерения координат точек  $\varepsilon$  и нагрузок  $\Delta$ . Метод не требует, чтобы координаты большинства звезд снимка имелись в каталоге.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бурый Л. В., Коронкевич В. П., Нестерихин Ю. Е. и др. Прецизионный фотограмметрический автомат // Автометрия. — 1974. — № 4.
2. Балодис Я. К., Лапушка К. К. Комплексная программа автоматической обработки снимков АФУ-75 на ЦВМ // Наблюдение искусственных спутников Земли. — 1974. — № 14.
3. Якубович В. А. О некоторых общих принципах построения обучающихся опознающих систем // Самообучающиеся автоматические системы. — М.: Наука, 1966.

Поступило в редакцию 7 июня 1985 г.

УДК 531.715 : 681.327

Ю. В. БАЙЦУРОВ, Ю. Г. ВАСИЛЕНКО

(Новосибирск)

#### ОБ УМЕНЬШЕНИИ ВЗАИМНОГО ПОПЕРЕЧНОГО СМЕЩЕНИЯ ПУЧКОВ В УГЛОВЫХ ИНТЕРФЕРОМЕТРАХ

В лазерных устройствах вывода изображений из ЭВМ с зеркально-механическим сканированием луча его положение на поверхности светочувствительного материала контролируется обычно с помощью углового интерферометра. Выполняется угловой интерферометр по дифференциальной схеме, в плечах которой симметрично относительно оси вращения сканирующего зеркала располагаются жестко связанные с ним угловые отражатели [1—4].

Существенным недостатком подобных схем угловых интерферометров является то, что при повороте сканирующего зеркала в общем случае наблюдается взаимное поперечное смещение интерферирующих пучков. Это приводит к снижению контраста интерференционной картины, а при фотоэлектрической регистрации к падению амплитуды выходного сигнала фотоприемника, снижению отношения сигнал/шум и в конечном счете к сужению диапазона контролируемых углов.

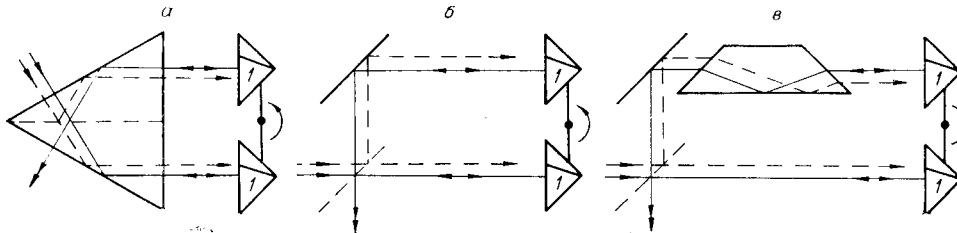
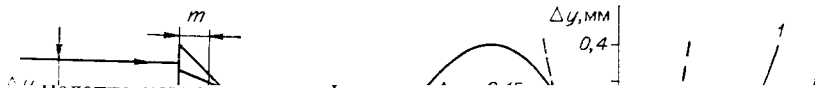


Рис. 1



Падение контраста интерференционных полос определяется не абсолютной величиной взаимного поперечного смещения интерферирующих пучков, а ее отношением к диаметру последних. Поэтому уменьшение этого падения, а значит, и расширение диапазона контролируемых углов, возможно за счет увеличения диаметра интерферирующих пучков [4]. Однако этот способ связан с усложнением схемы и, что самое главное, с увеличением геометрических размеров, а как следствие, и массы используемых уголкового отражателя, что отрицательно сказывается на динамических характеристиках отклоняющего устройства.

Ниже обсуждается возможность расширения диапазона контролируемых углов за счет минимизации абсолютного значения величины поперечного смещения интерферирующих пучков.

Все рассматриваемые здесь схемы интерферометров могут быть разбиты на две группы. Будем называть схему *инверсной*, если при смещении входного пучка интерферометра в плоскости сканирования перпендикулярно его оптической оси световые пучки, идущие к уголкового отражателям *I* (рис. 1, *a*), смещаются в противоположных направлениях, и *прямой*, если пучки смещаются в одном направлении (рис. 1, *б*).

Переход от инверсной схемы к прямой (и наоборот) возможен путем введения в одно из плеч интерферометра инвертирующего элемента. На рис. 1, *в* приведена инверсная схема, полученная из прямой схемы (см. рис. 1, *б*) установкой в одно из плеч призмы Дове. Смещенные пучки показаны на рис. 1 штриховыми линиями.

Пользуясь законами отражения и преломления, можно получить зависимость величины поперечного смещения пучка, отраженного уголкового отражателем, относительно положения падающего пучка от угла поворота  $\alpha$  отражателя вокруг оси *O* (рис. 2):

для верхнего отражателя

$$\Delta y_1 = \Delta y_{10} + 2 \left[ -l(1 - \cos \alpha) + m \sin \alpha - \frac{d \sin \alpha \cdot \cos \alpha}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}} \right], \quad (1)$$

для нижнего

$$\Delta y_2 = \Delta y_{20} + 2 \left[ l(1 - \cos \alpha) + m \sin \alpha - \frac{d \sin \alpha \cdot \cos \alpha}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}} \right]. \quad (2)$$

Здесь  $\Delta y_{10}$ ,  $\Delta y_{20}$  — начальные (при  $\alpha = 0$ ) значения  $\Delta y$ ;  $n$  — показатель преломления материала отражателя (остальные обозначения понятны из рис. 2).

Взаимное поперечное смещение интерферирующих пучков на входной апертуре фотоприемника углового интерферометра в зависимости от угла поворота сканирующего зеркала определяется следующими выражениями:

для прямой схемы

$$\Delta y_{\pi} = \Delta y_2 - \Delta y_1 = \Delta y_{\pi 0} + 4l(1 - \cos \alpha), \quad (3)$$

для инверсной —

$$\Delta y_{\pi} = \Delta y_2 + \Delta y_1 = \Delta y_{\pi 0} + 4 \left( m \sin \alpha - \frac{d \sin \alpha \cdot \cos \alpha}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}} \right). \quad (4)$$

Здесь  $\Delta y_{\pi 0} = \Delta y_{20} - \Delta y_{10}$  и  $\Delta y_{\pi 0} = \Delta y_{20} + \Delta y_{10}$  — начальные (при  $\alpha = 0$ ) значения взаимных поперечных смещений, которые могут быть выбраны произвольным образом перемещением отражателей относительно падающих на них пучков. Разложим правые части (3) и (4) в степенной ряд по  $\alpha$  с точностью до членов 3-го порядка

малости включительно, имеем

$$\Delta y_{\alpha} \approx \Delta y_{\alpha 0} + 2l\alpha^2; \quad (5)$$

$$\Delta y_{\alpha} \approx \Delta y_{\alpha 0} + 4 \left( m - \frac{d}{n} \right) \alpha - \frac{4}{6} \left( m - \frac{d}{n} \right) \alpha^3 + \frac{2d}{n} \left( 1 - \frac{1}{n^2} \right) \alpha^3. \quad (6)$$

Таким образом, величина взаимного поперечного смещения для прямой схемы определяется квадратичным по  $\alpha$  членом, а уменьшение ее возможно лишь с уменьшением  $l$ , которое, однако, приводит к часто недопустимому снижению чувствительности интерферометра  $s \sim 4l/\lambda$ .

Сплошными линиями показаны графики рассчитанных по формуле (4) зависимостей  $\Delta y_{\alpha}(\alpha)$  для  $n = 1,5146$  (стекло марки К-8,  $\lambda = 0,6328$  мкм),  $\Delta y_{\alpha 0} = 0$ ,  $l = 10$  мм,  $d = 10$  мм и трех различных значений  $m$ : 6,6 (кривая 1;  $m = d/n$ ), 6,34 и 6,1 мм (кривые 2 и 3 соответственно;  $m < d/n$ ). Считая предельно допустимым значение взаимного смещения 0,15 мм, что согласно [4] при диаметрах интерферирующих пучков 0,8 мм соответствует падению амплитуды выходного сигнала фотоприемника на 10%, находим (кривая 2), что максимально возможный угловой диапазон интерферометра составляет  $\pm 24^\circ$ . Экспериментально полученная зависимость нормированной амплитуды  $A_{\text{норм}}(\alpha) = A(\alpha)/A_{\text{max}}$  выходного сигнала фотоприемника от угла поворота сканирующего зеркала для этого случая показана на рис. 4 непрерывной линией. Некоторое расхождение между экспериментально определенным ( $\pm 21^\circ$ ) и расчетным ( $\pm 24^\circ$ ) значениями углового диапазона для инверсной схемы обусловлено отклонением параметров используемых угловых отражателей от идеальных.

Для сравнения на рис. 3 и 4 штриховыми линиями показаны соответствующие кривые для прямой схемы при  $l = 10$  мм. Значение  $\Delta y_{\alpha 0}$  выбрано равным 0,15 мм с целью получения максимального рабочего диапазона интерферометра, который в этом случае составляет  $\pm 7^\circ$ .

В заключение заметим, что при  $n = 1$ ,  $m = d$  и  $\Delta y_{\alpha 0} = 0$  правая часть (4) равна нулю для любых  $\alpha$ , т. е. при использовании в инверсной схеме полых угловых отражателей возможно полное исключение взаимного поперечного смещения интерферирующих пучков. В этом случае рабочий диапазон интерферометра определяется апертурными ограничениями.

Таким образом, применение прямой схемы оправдано лишь в случаях, когда либо контроль осуществляется в малом угловом диапазоне, либо не нужна высокая чувствительность интерферометра. Если же требования, предъявляемые к чувствительности интерферометра и его угловому диапазону, достаточно высоки, предпочтительнее использовать инверсную схему.

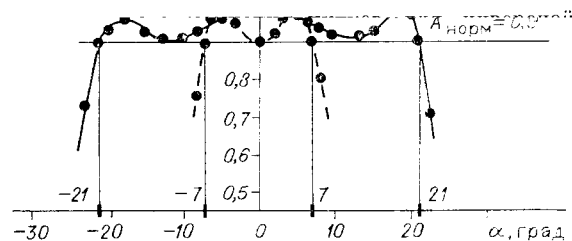


Рис. 4

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ленкова Г. А. Анализ и сравнение угловых сканирующих интерферометров // Автометрия.— 1981.— № 1.
2. Бессемельцев В. П., Бурнашев В. Н., Вертопрахова Л. С. и др. Высокорастворяющий лазерный сканер с интерферометрическим контролем // Автометрия.— 1983.— № 2.
3. Выкуб В. Г., Игошина Л. А., Мамаев В. Л. и др. Прецизионные измерения угловых перемещений объекта в пространстве // Измер. техника.— 1974.— № 2.
4. Дегтярев И. С., Ленкова Г. А., Лохматов А. И. Угловой интерферометр для лазерных сканирующих устройств // Автометрия.— 1987.— № 2.

Поступило в редакцию 15 июля 1987 г.