

07;12

©1992 г.

## ВОЛОКОННЫЕ РАСТРЫ В ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ УГЛОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

*В. Н. Ильин*

Рассмотрена возможность построения волоконных растров или растров на однопроводных световодах как измерительных мер, в частности, для воспроизведения угловых единиц и создания на их основе датчиков угловых перемещений и положений. Оценены разрешающая способность и некоторые виды погрешностей, возникающие в процессе измерения, и предложены приемы их компенсации.

### Введение

Альтернативным техническим решением известным измерительным мерам (радиальным и цилиндрическим линейкам, растрам, решеткам, дифракционным решеткам), применяемым для воспроизведения угловых единиц измерения, может стать волоконный измерительный растр (ВИР), изготавливаемый из отрезков оптических волокон (ОВ) или однопроводных световодов (ОЖС), имеющих диаметр от десятков до сотен мкм и уложенных в один слой на каркасе заданного радиуса ("беличье колесо") [1,2]. Принципиальная возможность изготовления волоконных растр, используемых в качестве транспарантов, рассматривалась также в [3].

На рисунке представлена оптическая схема цилиндрического волоконного растра (ЦВР) и первичного преобразователя угловых перемещений, поясняющих технологию изготовления ВИР, способы его освещения, формирования и считывания интерференционных полос. Показаны два основных варианта преобразователей, использующих пропускающие и отражающие растры. В первом случае считывание осуществляют на стороне изображения, сформированного за растром, а во втором — перед растром. Возможна и комбинация этих двух вариантов, когда отражающий слой выполнен с некоторым коэффициентом пропускания, например 0.5.

Особенности приведенных вариантов, их достоинства и недостатки будут проанализированы ниже. Однако здесь можно отметить, что выбор варианта в первую очередь зависит от его практической направленности и условий эксплуатации, так как во многих случаях использование растровой решетки, работающей в проходящем свете, затруднено из-за

конструктивных особенностей одно- и двухкоординатных систем, некоторые из которых позволяют устанавливать осветительную и приемные оптические системы с одной стороны.

Тем не менее для всех вариантов конструкций растров и первичных преобразователей оптическая схема его освещения, схема формирования интерференционных полос и схема фотоэлектрического считывания одинаковые.

### Работа растра в проходящем свете

На цилиндрический каркас  $1$  радиусом  $R$  наклеиваются отрезки оптических волокон  $2$  радиусом  $r$  (длиной 15..20 мм) в один монослой без видимого зазора. Полупрозрачное покрытие  $3$  (этот вариант охватывает два других) наносится на каждое ОВ либо до сборки их на каркасе, либо после, что предпочтительнее.

Для построения преобразователя применена трехпучковая схема освещения, которая обеспечивает получение за растром интерференционных полос с перестраиваемым периодом, переменную чувствительность преобразователя в широких пределах от единиц до сотен угл.с и нониусный принцип измерения.

В состав схемы освещения входят следующие элементы: двухщелевая диафрагма  $4$ , лазер  $5$ , коллиматор  $6$ , расширяющий лазерный пучок до значения  $S_0$  и светоделитель  $7$ , формирующий три пучка:  $S_1$  — опорный,  $S_2$  — первый измерительный под углом  $\alpha$  к опорному,  $S_3$  — второй измерительный под углом  $\beta$  к опорному. Пучки  $S_2$  и  $S_3$  формируются путем фронтального деления начального пучка. Вид АА поясняет конструкцию двухщелевой диафрагмы и расположение освещающих пучков. Пары пучков  $S_1S_2$  и  $S_1S_3$  интерферируют с образованием двух интерференционных картин  $I_1$  и  $I_2$ , метрическая цена полос  $E$  которых не зависит от размера элементов растра (диаметра волокна) и находится по известной формуле

$$E = \lambda/2 \sin \theta/2, \quad (1)$$

где  $\lambda$  — длина волны монохроматического излучения,  $\theta$  — угол, под которым пересекаются интерферирующие пучки (либо  $\alpha$ , либо  $\beta$ ).

Интерференционные картины, одна из которых опорная  $I_1$ , а другая дополнительная  $I_2$ , локализируются перед растром и передаются им в плоскость регистрации с коэффициентом увеличения

$$B_{\Pi} = X/f, \quad (2)$$

где  $X$  — расстояние от фокуса до плоскости изображения,  $f$  — фокусное расстояние линзы-волокна.

Пространственный период интерференционных полос находится как

$$H = B_{\Pi} E. \quad (3)$$

Вращение растра вызывает смещение интерференционных полос  $I_1^{\Pi}$  и  $I_2^{\Pi}$  в плоскости анализа в том же направлении (это легко объясняется законами геометрической оптики) и считывается фотоприемниками  $8$  —  $11$ . Пары фотоприемников  $8,9$  и  $10,11$  обеспечивают нониусный съём, а  $8,10$  и  $9,11$  фиксируют паразитный скачок фазы при переходе пучков от одного ОВ к другому.

Качество прямого изображения интерференционной картины рисунка в целом будет определяться оптическими свойствами волокон, действующих в этом случае как микролинзы. Погрешности диаметра волокна, неплотная упаковка друг к другу в монослое, приведут к фазовой ошибке, которая выразится в появлении пространственного паразитного сдвига интерференционных картин, сформированных отдельными волокнами на общей плоскости регистрации.

В случае наличия погрешности радиуса  $r$  волокна изменится коэффициент увеличения микролинз

$$B_n = 2X(n-1)(2n-1)/nr, \quad (4)$$

$n$  — показатель преломления стекла линзы-волокна.

Возникающую фазовую ошибку найдем как

$$\delta_1 = \frac{\pi}{2} \left( \frac{H_n}{4} - \frac{H^\pm}{4} \right) \bigg/ \frac{H^\pm}{4}, \quad (5)$$

где  $H_n$  — номинальная ширина полос,  $H^\pm$  — ширина полос при наличии погрешности  $\Delta r$ .

Оценка дает следующие результаты. Для ОВ с  $r = 0.4$  мм,  $r_{ж} = 0.3$  мм ( $r_{ж}$  — радиус жилы волокна),  $n = 1.45$ ,  $n_{ж} = 1.47$ ,  $E = 0.005$  мм ( $\lambda = 0.63$  мкм,  $\alpha = 7.22^\circ$ ), при расстоянии от раstra до фотоприемников 50 мм (или, что то же, от фокуса до плоскости изображения) ширина полос на изображении составит величину  $H_n = 595$  мкм. При  $\Delta r = +3$  мкм фазовая ошибка будет равна  $\Delta\varphi = 2.5^\circ$  или 1/144 часть интерференционной полосы (0.035 мкм). В ряде случаев такой ошибкой можно пренебречь.

Более значительный фазовый сдвиг вызовет смещение центра волокна из-за погрешностей его диаметра либо неплотной упаковки в монослое. Так, при цене полосы  $E = 3$  мкм погрешности волокна, кратные 1.5 мкм, будут вносить фазовую ошибку  $\delta_2 = 180^\circ$ , что недопустимо при высокоточных измерениях углового поворота.

Цена полос  $\Delta\varphi_1$  опорной интерференционной картины в угловой мере, сформированной пучками, сходящимися под углом  $\alpha$ , находится с учетом (1) из следующего выражения:

$$\Delta\varphi_1 = \lambda \cdot 360^\circ / 4\pi R \sin(\alpha/2), \quad (6)$$

а дополнительной соответственно из выражений

$$\Delta\varphi_2 = \lambda \cdot 360^\circ / 4\pi R \sin(\beta/2). \quad (7)$$

Видно, что цена полос определяется, кроме длины волны света и угла сходимости, еще только радиусом цилиндрической решетки. Углы  $\alpha$  и  $\beta$  отличаются на небольшую величину, составляющую несколько десятых долей градуса, а интерференционные картины имеют небольшую разницу в цене полос  $\delta\varphi = \Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2$ , что позволяет осуществить ноуиусный способ измерения.

Импульс ноуиусного совпадения (ИНС), возникающий при равенстве фаз интерференционных картин  $I_1^n I_2^n$ , принимается за начало отсчета или

реперную точку. В этом случае его положение и, следовательно, угловое положение объекта находятся с погрешностью не хуже  $\Delta\varphi_1$ . В описываемом устройстве ИНС генерируется 8 раз через каждые  $45^\circ$ . Между ИНС по каждому периоду опорной и дополнительной интерференционных полос определяется относительная разность фаз  $\Psi$ , которая всегда является некоторой частью периода  $I_1^n$  с числом полос  $N_1$ . Период легко выражается через число полос  $N_2$  дополнительной  $I_2^n$ , подсчитанное между соседними ИНС. Отсюда искомый угол поворота

$$\varphi^\circ = \Delta\varphi_1 N_1 + \Psi N_2 \delta\varphi / 360^\circ, \quad (8)$$

где первое слагаемое — целое число  $I_1^n$ , а второе — ее дробное значение. Условие нониусного совпадения запишется следующим образом:

$$N_1 - N_2 = 1, \quad (9)$$

где  $N_1 = 45^\circ / \Delta\varphi_1$  и  $N_2 = 45^\circ / \Delta\varphi_2$ .

Следовательно, (9) можем записать как

$$(45^\circ / \Delta\varphi_1) - (45^\circ / \Delta\varphi_2) = 1. \quad (10)$$

Подставим значение формул (6),(7) в (10)

$$[45^\circ 4\pi R \sin(\alpha/2) / \lambda \cdot 360^\circ] - [45^\circ 4\pi R \sin(\beta/2) / \lambda \cdot 360^\circ] = 1. \quad (11)$$

И после несложных преобразований получаем

$$\beta = 2 \arcsin(\sin(\alpha/2) - 2\lambda / r\pi). \quad (12)$$

Вследствие флуктуаций  $\lambda$  или  $r$ , например, при изменении условий внешней среды (температуры, давления, влажности) реперная точка (нониусный импульс) будет смещаться из своего начального положения, что приведет к ошибке измерения. Для ее устранения применяется электронная схема с реверсивным счетчиком. По первому ИНС импульсы интерференционного сигнала поступают на суммирующий вход, а по второму — на вычитающий. Если  $\lambda$  и  $r$  не изменились, то момент обнуления счетчика (или появление импульса переноса) совпадает с приходом счетного импульса нониусного совпадения, а если изменились, то в счетчике накопителя некоторое число, которое в дальнейшем используется в качестве поправки к результату измерения с учетом своего знака.

В лабораторных условиях измерительная решетка изготавливалась из одножильных световодов диаметром  $2r = 0.73$  мм, в качестве источника света применялся малогабаритный одномодовый лазер ЛГН-207А с  $\lambda = 0.63$  мкм. В качестве фотоприемников использовались фотодиоды ФД-256. Электронная схема обработки фотоэлектрических импульсов состояла из стандартных усилителей фототоков, компараторов, срабатывающих при переходе синусоидальных сигналов через нуль, интерфейса и микроЭВМ [4].

Уменьшить влияние указанных ошибок на результат измерения можно как технологическими, так и конструктивными приемами. К технологическим следует отнести ужесточение допусков на внешний диаметр, которое можно осуществить либо на стадии вытяжки волокна, либо путем

отбора и сортировки готовых отрезков (что более трудоемко). Ошибка фазового сдвига может быть уменьшена непосредственно в конструкции первичного преобразователя за счет использования перед растром двухщелевой диафрагмы (рис. 1, 4). Центры щелей, высота которых определяется диаметром пучка  $d$ , смещены на 0.5 диаметра волокна, а их ширина  $h$  составляет не менее  $3/4$  его диаметра. В этом случае формируются две (верхняя и нижняя) пространственно разделенные интерференционные картины с небольшой зоной перекрытия.

При движении растра поочередно считывается то верхняя, то нижняя интерференционные картины с фиксацией возможного скачка фазы при переходе от одного волокна к другому и последующей компенсацией возникающей при этом ошибки.

Оценка разрешающей способности преобразователя (формулы (1), (5), (6) или (7)) дает следующие результаты. Так, при  $\lambda = 0.63$  мкм,  $R = 40\,000$  мкм и  $d/2 = 15^\circ$  находим, что дискретность отсчета угла поворота (без интерполяции)  $\Delta\varphi_1 = 0.00174^\circ$  или  $6.3''$ . Рассмотренные выше ошибки измерения  $\delta_1$  — от изменения диаметра волокна и  $\delta_2$  — от неплотной укладки в монослой фиксируются и компенсируются при двухщелевой схеме освещения, поэтому доминирующей погрешностью измерения будет погрешность измерения фазы интерференционного сигнала  $\delta_3$ . Тогда  $\delta_1 = \delta_3$  и  $\delta_2 = \delta_3$ , а среднеквадратическая погрешность

$$\sigma = \sqrt{3\delta_3^2} \approx 0.17^\circ,$$

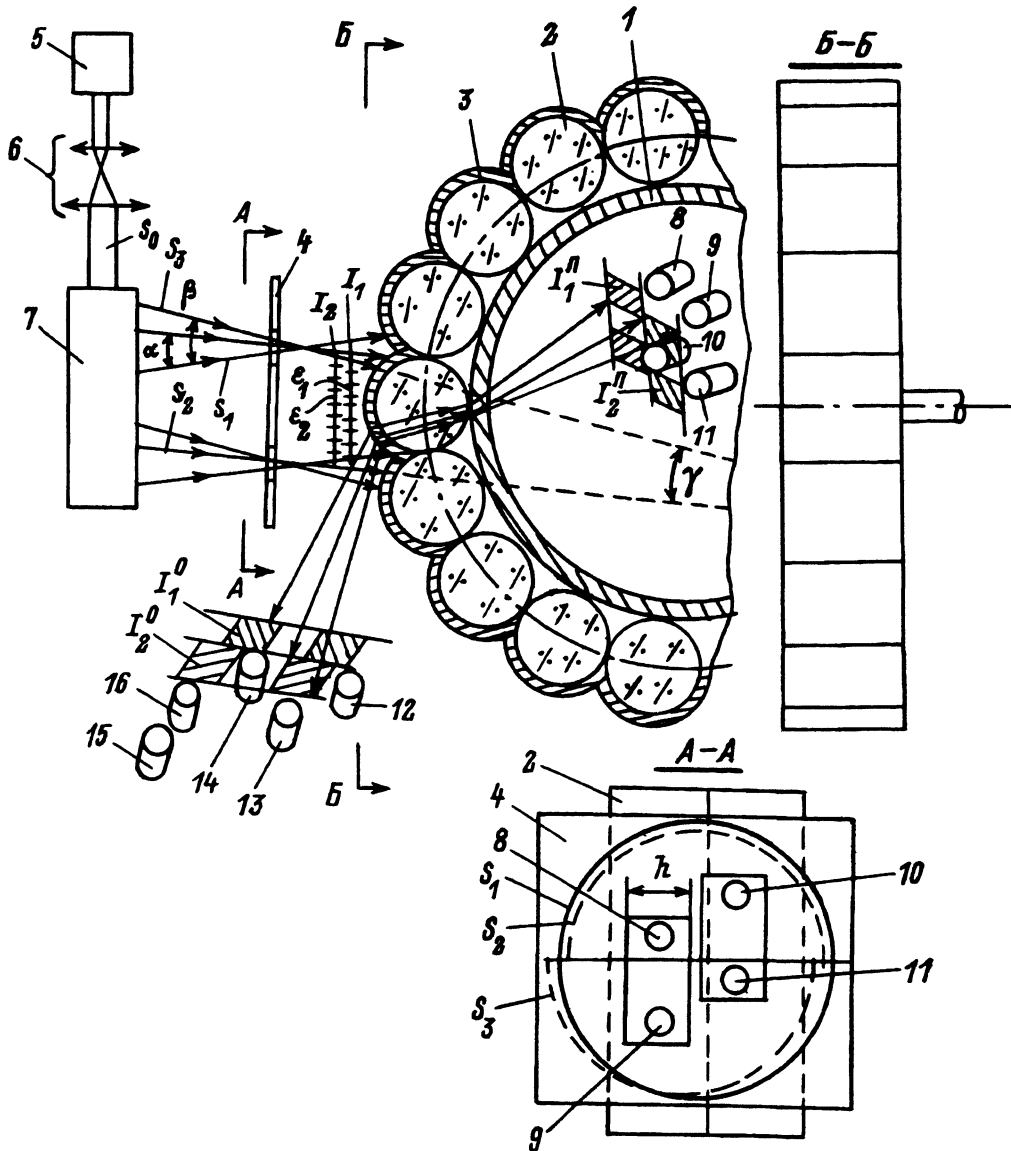
что составляет 0.00048 часть интерференционной полосы. Выше мы показали, что шаг интерференционной полосы в градусной мере  $\Delta_1 = 0.00174$ , поэтому разрешающая способность преобразователя для указанных выше параметров в пределе будет  $0.003''$ . Увеличивая угол сходимости интерферирующих пучков и диаметр цилиндрического растра, можно уменьшать дискретность отсчета, приближаясь при этом к пределу разрешающей способности. Здесь не рассматриваются приемы электрической интерполяции сигналов, так как очевидно, что ее применение уменьшит дискретность отсчета.

Следует также отметить, что для получения аналогичной дискретности отсчета у преобразователя на традиционной дифракционной радиальной решетке следует иметь шаг около 1.2 мкм.

### Работа решетки в отраженном свете

В ряде случаев применение отражательного растра предпочтительнее и приводит к некоторым преимуществам, хотя и требует дополнительных затрат на изготовление, связанных с тем, что интенсивность отраженного излучения существенно слабее прямого. Этот недостаток легко устраним путем, например, нанесения зеркального или полупрозрачного покрытия на одну из сторон растра (рис. 1, 3). В [5] показано, что отраженный от цилиндрической поверхности объекта свет (какой является поверхность волокна) при его движении и двухпучковой схеме освещения представляет собой бегущую волну.

При работе в отраженном свете решетка эквивалентна набору периодически расположенных цилиндрических зеркал, поэтому в плоскости



Первичный преобразователь угловых перемещений на цилиндрическом волоконном растре.

анализа, где размещены фотоприемники, формируется увеличенное изображение интерференционных полос с шагом

$$H_{от} = B_{от} r / 2, \quad (13)$$

где  $B_{от}$  — коэффициент увеличения цилиндрического зеркала.

Установка осветительного и приемного узлов с одной стороны раstra приводит к сокращению габаритов преобразователя вследствие больше-

го коэффициента линейного увеличения зеркального раstra (более 1.5 раз), при этом существенно повышается контрастность интерференционных полос, так как нет потерь в стекле. Кроме того, ширина интерференционных полос не будет зависеть от показателя преломления стекла, наличия его внутренних дефектов (пузырьков, трещин, нерасплавившихся кристаллов и т.п.) и аберраций.

Подложка из волокон в варианте на отражение выполняет функцию основы, несущей дискретные зеркальные поверхности заданного радиуса, и может быть заменена в общем случае другим материалом: металлом, пластмассой, керамикой и т.п. Вопрос о том, какой материал предпочтительнее, сводится к выбору технологии изготовления подложки, основным критерием которой должны быть высокие производительность, качество поверхности заданного радиуса и требования по механической жесткости. Подложка из ОВ во многих случаях предпочтительнее, так как волокно имеет высокую чистоту поверхности и не требует дополнительной обработки. Отраженные интерференционные полосы считаются соответственно парами фотоприемников 12,13 и 14,16.

Кроме описанных выше фазовых ошибок, определяющихся конструкцией раstra, возможны динамические фазовые ошибки во время работы преобразователя, связанные с биениями и перекосами раstra (эти ошибки присущи и другим преобразователям, в частности на дифракционных решетках). Биения и перекося приводят к уменьшению ширины интерференционных полос и их угловому наклону на некоторый угол  $i$ . Экспериментально установлено, что при малых  $i$  (единицы градусов) функция  $H = f(i)$  линейна, а коэффициент пропорциональности  $k = 3$ .

Скомпенсировать ошибки, возникающие в случае перекося растровой решетки на измерительной позиции в процессе ее вращения, удалось за счет введения дополнительного пятого фотоприемника, установленного на одной интерференционной полосе, например, с фотоприемником 16, который принимается за опорный.

Если фотоприемники 13 и 16 установлены друг от друга на расстоянии шага интерференционной полосы в направлении, совпадающем с направлением перемещения решетки, то пятый фотоприемник 15 установлен в одной плоскости с фотоприемниками 13 и 16 на расстоянии от фотоприемника 16, равном также шагу интерференционной полосы, и в направлении, перпендикулярном направлению перемещения решетки.

Относительно него фотоприемники 13 и 15 считают текущие фазы интерференционной полосы соответственно:  $\Psi_1$  — фазу от изменения величины перемещения и  $\Psi_2$  — фазу от изменения угла наклона, которые в случае перекося решетки получают некоторые абсолютные приращения со своим знаком.

В процессе измерения величины углового перемещения возможны два основных варианта: 1) фазы  $\Psi_1$  и  $\Psi_2$  имеют одинаковые знаки, в этом случае действительная фаза

$$\Psi_d = (\pm\Psi_1) - (\pm\Psi_2)/k, \quad (14)$$

где  $k = 3$ ; 2) фазы  $\Psi_1$  и  $\Psi_2$  имеют разные знаки, в этом случае действительная фаза

$$\Psi_d = (\pm\Psi_1) - (\mp\Psi_2)/k. \quad (15)$$

Предложенный преобразователь на ЦВР с нониусным отсчетом позволяет не только определять угловой поворот объекта, но и вычислять его положение по текущей разности фаз двух близких по шагу интерференционных полос  $I_1, I_2$  которая в интервале между ИНС имеет строго определенное значение. Если угол  $\beta$  установить таким (12), когда ЦРВ генерируется один раз наоборот, а в качестве опорного фотоприемника использовать фотодиодную линейку с электрическим опросом, то при снятии питающего напряжения и повторном включении при неподвижном ЦРВ его положение определяется однозначно по указанной выше разности фаз.

Таким образом, предложенный цилиндрический волоконный растр может быть с успехом применен для построения датчиков угловых перемещений, которые обладают достаточной точностью измерения и могут быть выполнены практически любых технически оправданных размеров. Пространственная частота интерференционных полос не определяется шагом составляющих растр элементов, а погрешности его элементов, равно как и температурные изменения размеров, не влияют на цену интерференционных полос. Изготовление растра возможно как путем последовательного набора (или намотки) единичных волокон на цилиндрический каркас, так и путем прессовки в специальных матрицах, методы которого в последнее время интенсивно развиваются.

#### Список литературы

- [1] Ильин В.Н. // Тез. докл. Всесоюз. конф. "Оптический, радиоволновой и тепловой методы неразрушающего контроля." Могилев, 1989. С. 41.
- [2] Ильин В.Н. АС. 1610253 (СССР). Растровая решетка. 1990. № 44.
- [3] Nachida H., Nitta J., Seka A., Kobayashi H. // Appl. Opt. 1984. Vol. 23. N 2. P. 330-332.
- [4] Александров В.К., Биенко Ю.Н., Ильин В.Н. Оптико-электронные средства размерного контроля технологических микробъектов. Минск: Наука и техника, 1988. 240 с.
- [5] Богомолов Е.Н., Ведерников В.М., Вертопрахов В.В. и др. // Автометрия. 1981. № 1. С. 55-63.

Институт электроники  
Минск

Поступило в Редакцию  
10 октября 1991 г.