

# МЕТОДЫ КАЛИБРОВКИ ПРИЗМ С ГРАНЯМИ, НЕ ИМЕЮЩИМИ ОТРАЖАЮЩЕГО ПОКРЫТИЯ, С ПОМОЩЬЮ ДИНАМИЧЕСКОГО ГОНИОМЕТРА

© 2011 г. М. С. Николаев; Ю. В. Филатов, доктор техн. наук

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет “ЛЭТИ”  
им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург

E-mail: maxim\_um@pisem.net

Рассматриваются методы повышения точности калибровки оптических призм, не имеющих отражающего покрытия на гранях, с использованием динамического гониометра. Даётся краткая оценка возможности их использования.

**Ключевые слова:** динамический гониометр, нуль-индикатор, призма, калибровка, дисперсия, аппроксимация.

Коды OCIS: 120.0120, 120.3930.

Поступила в редакцию 09.08.2010.

Лазерные гониометры – системы, предназначенные для измерения плоских углов, – широко используются в последние годы в технике прецизионных угловых измерений, в фундаментальных физических и метрологических исследованиях, при аттестации различных преобразователей угла, оценке статических и динамических параметров сложного углового движения объектов различного класса [1, 2]. Структурная схема динамического гониометра представлена на рис. 1. Процесс калибровки заключается в фиксации угловых положений калибруемой призмы, при которых визирная

ось нуль-индикатора (НИ) совпадает с нормалью к грани.

При калибровке многогранных призм лазерный гониометр демонстрирует точностные характеристики на уровне эталонных систем. Однако потребность в таких высокоточных системах на мировом промышленном рынке не так велика. В то же время гораздо большим спросом пользовался бы автоматический гониометр, предназначенный для калибровки неправильных трех-, четырехгранных призм различной формы с гранями, не имеющими отражающего покрытия. Процесс калибровки призм включает привязку к угловым положениям призмы для формирования моментов съема информации с образцового преобразователя угла. Для привязки к граням призмы в динамике используется интерференционный НИ, принцип действия которого основан на интерференции пары световых пучков, отраженных от грани аттестуемой призмы. Один из возможных вариантов схемы построения такого НИ приведен на рис. 2. Пучок света от источника 1, проходя через призму Кестерса 2, расщепляется на два пучка, которые падают на контролируемую отражающую поверхность 3. Отразившись от контролируемой поверхности, после прохождения призмы Кестерса пучки попадают на фотоприемник 4. При этом угол между ними пропорционален углу поворота отражающей поверхности  $\alpha$ . В результате интерференции пучков при вращении отражаю-

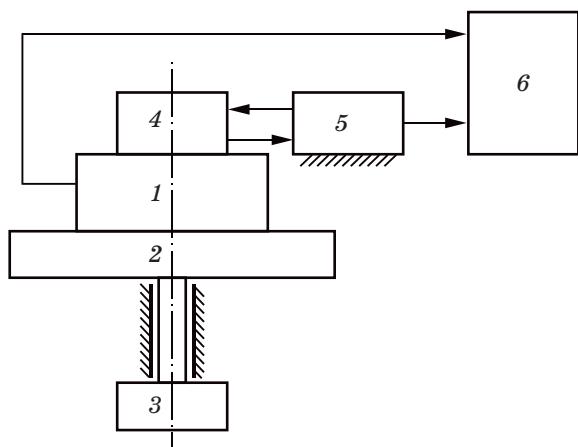


Рис. 1. Схема динамического гониометра. 1 – датчик угла, 2 – поворотная платформа, 3 – привод, 4 – калибруемая призма, 5 – нуль-индикатор, 6 – вычислительный блок.

щей поверхности на выходе фотоприемника формируется выходной сигнал

$$u(\alpha) = \gamma I_0 db \left( 1 + \frac{\sin(2\pi b\beta/\lambda)}{2\pi b\beta/\lambda} \frac{\sin(2\pi d\alpha/\lambda)}{2\pi d\alpha/\lambda} \cos(4\pi(\alpha h + l(n/2 - 1))/\lambda) \right),$$

где  $u(\alpha)$  – выходной сигнал,  $\alpha$  – угол падения пучков на отражающую поверхность,  $\gamma$  – чувствительность фотоприемника,  $I_0$  – интенсивность светового пучка,  $d$  и  $b$  – ширина и высота апертуры фотоприемника,  $\lambda$  – длина волны,  $\beta$  – угол разворота двух половин призмы Кестерса в вертикальной плоскости,  $h$  – расстояние между световыми пучками при их падении на отражающую поверхность,  $l$  – взаимное линейное смещение элементов призмы Кестерса при ее склейке,  $n$  – показатель преломления материала призмы Кестерса [3].

В связи с тем что в случае призм с гранями, не имеющими отражающего покрытия, происходит отражение не только от внешних, но и от внутренних граней, необходимо учитывать эти отражения. При этом наиболее сложным является случай, когда световые пучки, отраженные от наружной и внутренней граней, полностью или частично перекрываются. Тогда выходной сигнал с фотоприемника НИ может представлять собой как пару взаимно искаженных одиночных интерференционных им-

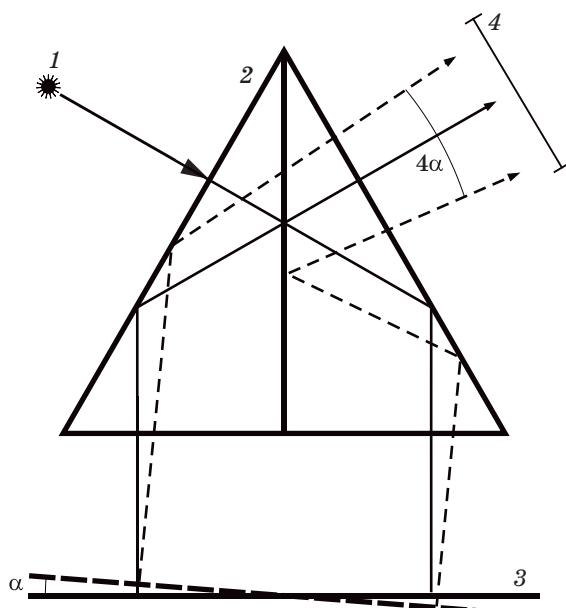


Рис. 2. Схема интерференционного нуль-индикатора с призмой Кестерса. 1 – источник света, 2 – призма Кестерса, 3 – отражающая поверхность, 4 – апертура фотоприемника.

пульсов, так и их сумму, что приводит к погрешностям определения положения нормали к грани. В качестве примера на рис. 3 показана форма выходного сигнала с фотоприемника НИ в случае, когда взаимное наложение импульсов позволяет наблюдать их раздельно (кривая 1), и в случае почти полного их наложения (кривая 2).

При калибровке призм с гранями, не имеющими отражающего покрытия, для снижения этих погрешностей можно использовать следующие методы:

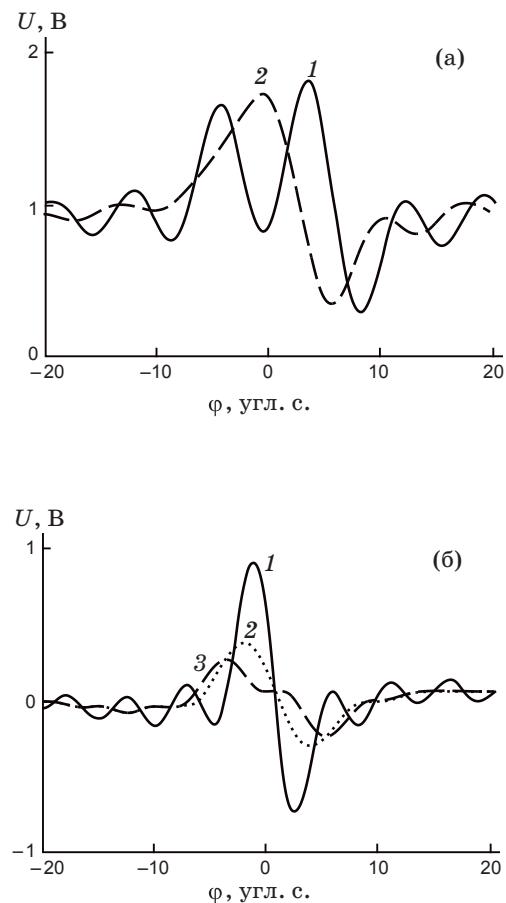


Рис. 3. Форма выходного сигнала с фотоприемника нуль-индикатора. а – импульсы от двух граней при использовании монохромного источника света, б – одиночный импульс при различных углах преломления при использовании широкополосного источника света (пояснения в тексте).

**А. Выбор такой схемы измерений, при которой пучки от наружной и внутренней граней не будут перекрываться.** Для реализации данного метода можно использовать наклонное падение пучка на грань с его последующим отражением от опорного зеркала (рис. 4а).

При использовании данного метода необходимо учитывать следующие факторы:

1. Существенное уменьшение интенсивности световых пучков при двукратном отражении от грани, не имеющей отражающего покрытия. Увеличения интенсивности можно достичь путем увеличения угла падения пучков и, как следствие, увеличения коэффициента отражения грани, не имеющей отражающего покрытия. Однако максимальный угол падения ограничен соотношением геометрических размеров аттестуемой призмы с шириной пучков и расстоянием между их центрами. Так, расчеты показывают, что при ширине пучка 17 мм для призмы с минимальной шириной грани 30 мм максимально возможный угол падения составляет порядка  $55^\circ$ . При этом коэффициент отражения по интенсивности в случае коэффициента преломления 1,5 не превышает 14%, что при двукратном отражении (без учета потерь при отражении от опорного зеркала) дает уменьшение интенсивности световых пучков более чем в 50 раз. В то же время при нормальном падении на грань без отражающего покрытия коэффициент отражения составляет порядка 4%, что приводит к ослаблению пучков в 25 раз.

2. Возможность нормального падения пучка на внутреннюю грань, а также на опорное зеркало после ряда отражений в аттестуемой призме (рис. 4б).

3. Как следствие пп. 1, 2, необходимость изменения конфигурации измерительной схемы в зависимости от аттестуемой призмы.

**Б. Снижение амплитуды сигналов от внутренних граней путем использования широкополосного источника света в НИ,** что приводит к увеличению ширины и уменьшению амплитуды интерференционного импульса за счет дисперсии.

Расчеты показывают, что при малых углах преломления (в зависимости от ширины спектра источника света, а также оптических характеристик материала аттестуемой призмы) данный метод оказывается неэффективным, поскольку в этом случае разность углов преломления для различных длин волн невелика и, как следствие, существенного уменьшения амплитуды интерференционного импульса не происходит. Однако при достаточно больших углах преломления он позволяет эффективно бороться с импульсами от внутренних граней. Так, при использовании в НИ источника белого света ( $\lambda = 380-780$  нм) при аттестации призм из стекла ЛК3 ( $n_e = 1,48912$ ,  $v_e = 69,85$ ) существенное размытие интерференционного импульса происходит, если угол преломления, соответствующий нормальному падению на внутреннюю грань, не меньше  $9'$ . На рис. 3б приведена форма сигнала с фотоприемника НИ при углах преломления 0, 6 и 9 угл. мин. (кривые 1, 2 и 3 соответственно).

**В. Алгоритмическое разделение импульсов от разных граней.** Данный метод подразумевает оцифровку выходного сигнала непосредственно с фотоприемника НИ с последующей аппроксимацией полученных данных теоретической зависимостью.

Аппроксимирующую функцию для сигнала от двух граней определяем как

$$U(\varphi) = A_0 + \sum_{i=1}^2 A_{1i} \frac{\sin(c_1(\varphi - \varphi_{0i}))}{c_1(\varphi - \varphi_{0i})} \cos(c_2(\varphi - \varphi_{0i}) + c_3),$$

где  $A_0 = \gamma I_0 db$ ,  $A_{1i} = \gamma I_i db \frac{\sin(2\pi b\beta/\lambda)}{2\pi b\beta/\lambda}$  ( $I_0$  – суммарная интенсивность пучков от граней,  $I_i$  – интенсивность световых пучков от  $i$ -й грани);  $c_1 = 2\pi d/\lambda$ ,  $c_2 = 2\pi h/\lambda$ ,  $c_3 = 4\pi l(n/2 - 1)/\lambda$ ,  $\varphi_{0i}$  – положение, соответствующее нормальному падению пучков на  $i$ -ю грань. Таким образом, определив параметры аппроксимирующей функции, можно определить положения призмы,

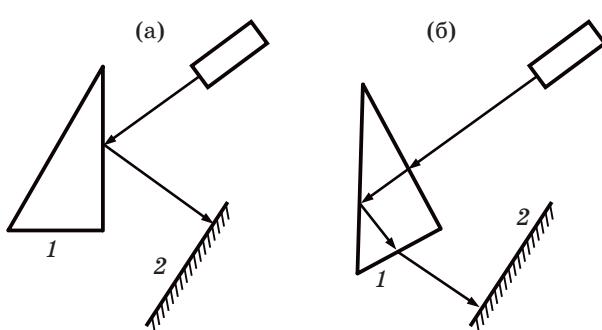


Рис. 4. а – наклонное падение пучков на грань аттестуемой призмы 1, б – нормальное падение на опорное зеркало 2 после отражений от испытуемой призмы 1.

соответствующие нормальному падению пучков на каждую грань. Кроме того, соотношение найденных амплитуд, при наличии априорной информации о конфигурации призмы, может использоваться для определения положения, соответствующего нормальному падению пучков на грань, непосредственно обращенную к НИ.

Поскольку аппроксимирующая функция может описывать сигнал, не имеющий двух выраженных пиков, разрешающая способность данного метода ограничена только точностью расчетов, а также искажением выходного сигнала фотоприемника вследствие шумов. Поэтому данный метод имеет более высокое разрешение, чем аппаратное формирование управляющего сигнала по фронту или по пику интерференционного импульса. Кроме того, он учитывает взаимное искажение близко расположенных раздельных импульсов, что позволяет уменьшить погрешность измерений.

Таким образом, в качестве наиболее перспективного метода калибровки призм с непокрытыми гранями представляется использование цифровой обработки выходного сигнала

с фотоприемника НИ. При необходимости данный метод можно применять в сочетании с наклонным падением. Использование при этом широкополосного источника света представляется нецелесообразным, так как увеличение ширины интерференционного импульса приводит к уменьшению разрешающей способности алгоритмического метода. Оно полезно лишь тогда, когда априори известно, что нормальное падение пучков на внутреннюю грань возможно только при достаточно больших углах преломления.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бурнашев М.Н., Лукьяннов Д.П., Павлов П.А., Филатов Ю.В. Развитие методов и средств лазерной динамической гониометрии // Квант. электрон. 2000. Т. 30. № 2. С. 141–146.
2. Filatov Yu., Loukianov D.P., Probst R. Angle measurement by means of a ring laser goniometer // Metrologia. 1997. V. 34. P. 343–351.
3. Филатов Ю.В. Анализ работы интерференционного углового нуль-индикатора // ОМП. 1989. № 4. С. 13–16.