

Исследование углового экзаменатора на основе интерферометра Физо с расширенным диапазоном измерений

К. В. ЧЕКИРДА, В. Л. ШУР, А. Я. ЛУКИН, М. А. КОСЬМИНА, Г. И. ЛЕЙБЕНГАРДТ

Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева, С.-Петербург, Россия, e-mail: G.I. Leibengardt@vniim.ru

Представлены результаты разработки и исследования углового экзаменатора, построенного на основе многолучевого интерферометра Физо. Экзаменатор имеет диапазон воспроизведения углов до $\pm 600''$. Случайная погрешность измерений не более $0,01''$, систематическая — не превышает $0,01''$. Экзаменатор можно применять для поверки и калибровки высокоточных электронно-цифровых автоколлиматоров.

Ключевые слова: интерференционный экзаменатор, интерферометр Физо, плоский угол.

The results of development and study of angle examiner based on multibeam Fizeau interferometer are presented. The interference examiner has the reproduction range of angles up to $\pm 600''$. The random error of measurement does not exceed $0,01''$, the systematic error is less than $0,01''$. The examiner may be used for verification and calibration of high precision electronic digital autocollimators.

Key words: interference examiner, Fizeau interferometer, plane angle.

Интерференционные экзаменаторы применяют для воспроизведения единицы плоского угла и ее передачи автоколлиматорам. На Государственном первичном эталоне единицы плоского угла ГЭТ 22—2014 с помощью автоколлиматоров измеряют углы многогранных призм. До 2014 г. в состав указанного эталона входил экзаменатор, построенный по схеме двухлучевого лазерного интерферометра, в котором воспроизведение единицы плоского угла реализовано на основе уравнения, связывающего линейное перемещение отражателей с базой экзаменатора. Длину базы определяли с помощью аттестованной штриховой меры [1].

В процессе модернизации государственного первичного эталона (ГПЭ) разработан новый экзаменатор на основе многолучевого интерферометра Физо [2]. Диапазон измерений экзаменатора составляет $\pm 15''$. Исследования показали, что в указанном диапазоне неисключенная систематическая погрешность (НСП) воспроизведения единицы угла не превышает $0,006''$, случайная — $0,005''$.

В связи с необходимостью решения задач поверки и калибровки электронно-цифровых автоколлиматоров с диапазоном измерений $\pm 600''$ и более были проведены дальнейшие исследования созданного экзаменатора с целью рас-

ширения его рабочего диапазона. Схема интерферометра приведена на рисунке. He—Ne-лазер 1 HRC015 фирмы THORLABS освещает интерферометр. Частота лазера стабилизирована методом автоматического выравнивания амплитуд ортогонально-поляризованных компонент, относительная погрешность стабилизации частоты не превышает $2 \cdot 10^{-8}$. Микрообъектив 2 фокусирует излучение на вращающийся рассеиватель 3. С помощью объектива 4 излучение коллимируется и направляется в интерферометр 9, состоящий из полупрозрачного 7 и отражающего 10 зеркал. Последнее можно поворачивать с помощью привода на основе шагового электродвигателя, управляемого компьютером. Полупрозрачное зеркало 5 проецирует интерференционную картину (полосы) на фотоприемную матрицу видеокамеры 6 высокого разрешения (модель BR-6600, производитель НПК «ЕС-ЭКспертс», диагональ матрицы 1 дюйм, 2200×3000 пикселей, размер пикселя $3,5 \times 3,5$ мкм).

Анализ, проведенный в [3], показывает, что интерференционное поле в небольших областях пространства имеет период

$$b = \lambda_0 / (2n \sin \alpha), \quad (1)$$

где λ_0 — длина волны в вакууме; n — показатель преломления среды; α — угол между зеркалами.

Форма, резкость полос и значение нелинейных добавок к фазе интерференционной картины зависят от параметров интерферометра Физо, прежде всего от коэффициентов отражения зеркал. По данным [3] нелинейные добавки к фазе пренебрежимо малы при среднем значении коэффициента отражения используемых зеркал 0,65, при этом искажений интерференционной картины не происходит.

Оценим систематическую погрешность экзаменатора. При малых углах в соответствии с (1) $\alpha = \lambda_0 / (2nb)$. Таким образом, систематическая погрешность воспроизведения угла включает составляющие, определяемые погрешностями

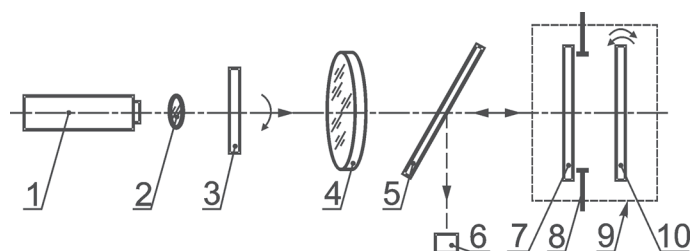


Схема интерферометра Физо:

1 — He—Ne-лазер; 2 — микрообъектив; 3 — рассеиватель; 4 — объектив; 5, 7, 10 — два полупрозрачных и отражающее зеркала, соответственно; 6 — видеокамера; 8 — диафрагма; 9 — интерферометр

длины волны лазера, показателя преломления и ширины (периода) полосы.

Погрешность длины волны λ_0 частотно-стабилизированного лазера, определенная относительно эталонного He—Ne/I₂-лазера составляет $1,2 \cdot 10^{-8}$ мкм, что приводит к погрешности в рабочем диапазоне измеряемых углов $\Delta\alpha_\lambda \leq 2,4 \cdot 10^{-5}$ ". Погрешность определения показателя преломления воздуха $\Delta n = 1 \cdot 10^{-6}$ (при погрешностях определения температуры $\Delta t = 0,5$ °С и давления $\Delta p = 133,3$ Па) приводит к погрешности $\Delta\alpha_n = 0,001$ ".

Основной вклад в погрешность измерения угла вносит погрешность определения ширины интерференционной полосы. Измерение ширины полосы включает следующие этапы: определение отношения периода интерференционной картины к периоду структуры матрицы видеокамеры; калибровку этой структуры. При измерении ширины полосы используется всё рабочее поле матрицы видеокамеры, т. е. измеряется суммарная ширина полос, определяется количество периодов и рассчитывается среднее значение периода (ширины одной полосы).

Как показали исследования, погрешность определения расстояния между границами равной фазы периодической интерференционной структуры (при обработке с помощью разработанного программного обеспечения) составляет около 0,01 пиксела. Таким образом, при ширине рабочего поля матрицы 3000 пикселей относительная погрешность определения ширины полосы составит $0,3 \cdot 10^{-5}$. Обнаружено, что при большой ширине полосы (малых углах клина интерферометра Физо) относительная погрешность измерений увеличивается. Это связано с искажениями интерференционной картины, обусловленными неидеальностью оптических элементов. Поэтому в качестве нулевого положения рабочего зеркала экзаменатора (зеркала, которое является отражателем при работе с автоколлиматором) выбрано положение, соответствующее углу клина интерферометра Физо около 100"; ширина полосы — около 0,7 мм, в рабочем поле матрицы помещается около 15 полос.

Для реализации рабочего диапазона экзаменатора 1200" необходимо повернуть рабочее зеркало экзаменатора до положения, при котором угол клина интерферометра составит 1300". Это соответствует ширине полос около 0,05 мм, при этом в рабочем окне матрицы помещается около 200 полос. Такой выбор диапазона значений угла клина интерферометра Физо является оптимальным, с точки зрения погрешности измерений ширины полос, и соответственно рабочего угла экзаменатора. Дальнейшее увеличение числа полос (уменьшение их ширины) приводит к некоторому увеличению погрешности измерений, что связано с уменьшением соотношения ширины полос и размера пиксела, а также влиянием шумов матрицы.

Для вычисления угла измеренный в пикселах период интерференционных полос должен быть пересчитан в микрометры с учетом размера пиксела. Истинный размер пиксела может быть определен разными методами, однако для учета неизбежного теплового расширения матрицы необходима калибровка на месте.

Калибровка матрицы видеокамеры проводится следующим образом. Перекрытием пучка, отраженного от зеркала 10, убирается интерференция, а на пути оставшегося светового пучка помещается стеклянная штриховая мера. Алгоритм обработки не чувствителен к распределению интенсивности

внутри периода, поэтому период изображения штриховой меры вычисляется так же, как и период интерференционных полос, и может быть использован для определения размера пиксела. Погрешность калибровки определяется погрешностью аттестации штриховой меры, которая составляет 0,03 мкм. При ширине матрицы 10 мм относительная погрешность калибровки составит $0,3 \cdot 10^{-5}$, из-за нестабильности температуры она увеличивается и может достигать $1 \cdot 10^{-5}$. Таким образом, суммарная относительная погрешность воспроизведения углов составит $1,1 \cdot 10^{-5}$, что соответствует абсолютной погрешности не более 0,001—0,01".

Использованный алгоритм вычислений периода и фазы интерференционных полос, предназначенный для анализа изображений с матричных видеопреобразователей [4], состоит из двух частей.

Базовый алгоритм основан на одномерном массиве данных о распределении интенсивности f_j , который может являться как отдельной строкой введенного изображения, так и усредненными данными по совокупности соседних строк — ленте. Анализ лент вместо отдельных строк изображения позволяет существенно снизить затраты времени на обработку без потери точности, так как при объединении строк в ленты происходит подавление аддитивных шумов на изображении. Зависимость погрешности измеряемых параметров от числа лент носит асимптотический характер и при увеличении числа лент быстро выходит на уровень, близкий к минимально возможному (при построчной обработке), что позволяет быстро и с необходимой точностью обрабатывать интерференционную картину в режимах, когда скорость обработки является критическим параметром. Работа с лентами особенно важна при применении многопиксельных камер (2200×3000 пикселей).

Для нахождения периода и фазы интерференционных полос к исходному массиву f_j применяют вейвлет-преобразование. Получают массив

$$F_j = \sum_{k=0}^{m-1} f_{j+k} e^{-i2\pi k/m},$$

где m — целочисленный период вейвлета; $j = 1, \dots, N-m$.

В простейшем случае, когда период полос целый и равен m , локальная фаза может быть вычислена как $\phi_j = \arg(F_j)$. В остальных случаях формула для расчета фазы оказывается более сложной и требует предварительной оценки периода. Амплитуда F_j зависит от разности между периодом сигнала и m и имеет максимум при их равенстве. Таким образом, преобразование работает также как частотный фильтр, подавляющий высоко- и низкочастотные аддитивные шумы.

Для вычисления периода полос восстанавливают полную фазу, учитывающую число периодов (для строки содержащей K периодов, последняя точка имеет фазу примерно $2\pi K$). Между найденной полной фазой и номером точки существует линейная зависимость с угловым коэффициентом ω . Аппроксимация зависимости методом наименьших квадратов позволяет найти среднее значение и стандартное отклонение периода полос b . Также вычисляют среднюю фазу ϕ и ее стандартное отклонение.

На следующем этапе значения периода и фазы для отдельных лент используют для восстановления пространственного распределения периода и фазы интерференционной картины. Вычисляют угол наклона полос γ и средний по всему изображению период. Для повышения точности из-

мерений и дополнительной оценки погрешности, связанной с временными флуктуациями отсчета, программа обработки интерференционной картины обеспечивает предварительное цифровое накопление (суммирование) вводимых изображений и многократное измерение с усреднением отдельных отсчетов. Необходимый для вычисления угла показатель преломления воздуха находят по стандартной формуле Эдлена, параметры температуры, давления и влажности воздуха вводит оператор. Помимо нахождения угла программа обеспечивает управление контроллером шагового двигателя, осуществляющего поворот зеркала 10. Имеется возможность повернуть зеркало на любой заданный оператором угол с плавным разгоном и торможением.

Для калибровки цифровых автоколлиматоров программа позволяет вводить отсчет поверяемого прибора для использования его в протоколе совместно с результатом измерения угла экзаменатором. В настоящее время отсутствует стандартный интерфейс для связи с программами цифровых приборов, поэтому возможность полностью автоматической поверки — поворотов и измерений без участия оператора реализована только для автоколлиматоров ВНИИМ (в виде встроенного программного модуля).

Заключение. Разработан и исследован экзаменатор на основе многолучевого интерферометра Физо, обеспечивающий воспроизведение плоского угла в диапазоне до $\pm 600''$. Преимуществом созданного интерференционного экзаменатора является широкий диапазон измерений. Исследования показали, что случайная погрешность не превышает $0,01''$. Неисключенная систематическая погрешность определяет

ся в основном погрешностью измерения периода интерференционных полос и составляет не более $0,01''$. Калибровка системы измерений периода интерференционных полос производится с помощью штриховой меры длины откалиброванной на ГПЭ единицы длины — метра. Экзаменатор можно применять для поверки и калибровки высокоточных электронно-цифровых автоколлиматоров, имеющих диапазон измерений $\pm 600''$ и более.

Л и т е р а т у р а

1. Шестопалов Ю. Н., Мартынов В. Т., Брда В. А. Новый государственный первичный эталон единицы плоского угла // Исследования в области угловых измерений: Сб. науч. тр. Л.: Энергоатомиздат, 1983. С. 42—49.
2. Чекирда К. В., Косьмина М. А., Лейбенгардт Г. И., Шур В. Л., Лукин А. Я. Совершенствование Государственного первичного эталона плоского угла // Измерения и испытания в судостроении и смежных отраслях. Судометрика-2014: 5-я Всерос. науч.-техн. конф. Тез. докл. СПб, 2014. С. 157—159.
3. Понаровский А. А., Томашевский Ю. Ф. Пространственная структура многолучевой интерференции Физо // Оптика и спектроскопия. 1978. Т. 15. Вып. 4. С. 773—778.
4. Компан Т. А., Коренев А. С., Лукин А. Я. Автоматизированная система дилатометрических измерений с многопараметрической обработкой информационной картины // Измерительная техника. 2001. № 6. С. 31—35.

Дата принятия 02.06.2015 г.

53.089.68

Измерения геометрических параметров резьбовых калибров

Ю. Г. ЗАХАРЕНКО, Н. А. КОНОНОВА, А. А. МОСКАЛЁВ

Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева, С.-Петербург, Россия, e-mail: Y.G. Zakharenko@vniim.ru

Приведены характеристики государственного эталона 1-го разряда единицы длины — метра в диапазоне 10^{-6} —1100 мм, введенного в эксплуатацию во ВНИИМ им. Д. И. Менделеева. Представлены результаты исследований эталона в области метрологического обеспечения резьбовых калибров.

Ключевые слова: единица длины, эталон, резьба, резьбовые калибры, средний диаметр резьбы.

The general characteristics of the State first echelon standard of unit of length — meter in the range 10^{-6} —1100 mm placed in service in VNIIM are represented. The standard research results in the field of metrology assurance of thread gauges are given.

Key words: unit of length, standard unit, thread, thread pitch gauges, average thread pitch diameter.

Резьбовые соединения широко используют во многих отраслях промышленности. Требования по надежности и износостойкости таких соединений различаются в зависимости от области применения. Например, в условиях вакуума или при сложной разнонаправленной нагрузке в узлах, работающих под давлением, они значительно возрастают. Интенсивный рост и развитие промышленности (главным

образом отраслей нефте-, газодобывающего комплексов и аэрокосмической отрасли) сопровождаются повышением требований к надежности существующих и вновь выпускаемых деталей. Так как эксплуатационные характеристики резьбовых соединений в первую очередь определяются точностью изготовления геометрических элементов резьбы, необходим повышенный контроль таких элементов. Для этого