

18. Разработка программных средств контроля качества защитных синтезированных голограмм по данным различных оптических систем измерения

В. П. Бессмельцев¹, Я. А. Киприянов^{1,2}

¹ Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

² Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

Задача точного контроля качества голограмм как во время производственного процесса, так и для определения контрафактных изделий, являлась и остается актуальной и задачей как для производителей, так и криминалистов. В настоящей работе рассмотрены методы прямого измерения параметров синтезированных дифракционных элементов (синтезированных голограмм) с помощью совместной обработки данных оптической дифрактометрии и оптической микроскопии высокого разрешения, а также сопоставления данных исходными САД-моделями.

Ключевые слова: Оптика, Голография, Дифракционные оптические элементы.

Цитирование: Бессмельцев, В. П. Разработка программных средств контроля качества защитных синтезированных голограмм по данным различных оптических систем измерения / В. П. Бессмельцев, Я. А. Киприянов // HOLOEXPO 2018 : XV международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. — С. 80–84.

Введение

Основой быстрых методов контроля качества и подлинности синтезированных защитных голограмм (особенно по технологии дот-матрикс) является использование принципа сравнения ряда изображений образцовых изделий и исследуемых, при освещении их световыми лучами под одинаковыми углами к исследуемому изображению. При этом угол освещения обоих объектов должен меняться в широких пределах, но быть одинаковым для образцов [1]. Типичная структура такого автоматизированного устройства приведена на рис. 1. В этом устройстве светодиодные источники LEDs A и B последовательно под разными углами освещают контролируемый документ. Синхронно с переключением угла освещения камера фотографирует изображение или его фрагмент и направляет в процессор обработки vision processor.

Однако недостатком такого подхода является то обстоятельство, что данный метод не позволяет получить точные параметры исследуемой голограммы и поэтому невозможно сравнить полученные от такой системы данные с полученными с помощью других технологий и исходным САД проектом.

При проектировании и создании голограмм с помощью дот-матрикс технологий, полная голографическая информация кодируется и записывается в виде элементарных дифракционных матриц микрорешеток — так называемых голопикселей, шаг, форма и размер, профиль и направление которых может быть описан функцией

$$F_{dm}[x, y, st(x, y), d(x, y), S(x, y), \alpha(x, y)],$$

где x, y — координаты голопикселя, $st(x, y)$ — шаг между голопикселями, $d(x, y)$ — период микрорешетки, $S(x, y)$ — функция описывающая форму и размер занимаемую микрорешеткой голопикселя, $\alpha(x, y)$ — угол наклона микрорешетки относительно выбранной оси.

Известно [2], что защитные голограммы могут иметь площадь до $100 \times 100 \text{ мм}^2$, диапазон периодов решеток $d(x, y)$ 0,5–1,5 мкм, точность и воспроизводимость по периоду и направлению соответственно выше 50 нм и 5° , размер $S(x, y)$ голопикселя 5–100 мкм.

Теоретически, конфокальная и интерференционная микроскопия позволяет провести прямое измерение периода, угла наклона и глубины микрорешеток, составляющих структуру защитной синтезированной голограммы. Основным препятствием на пути применения данных методов является относительно низкое быстродействие. Типичное время сканирования зоны размером $100 \times 100 \text{ мкм}^2$ одноканальным конфокальным микроскопом — 2–10 секунд, следовательно, сканирование поверхности размером $10 \times 10 \text{ мм}$ займет не менее 3 часов. Кроме того, оптическая микроскопия высокого разрешения дает хорошие результаты на мастер-матрицах, однако не так эффективна на готовых изделиях, покрытых защитной полимерной пленкой.

В ИАиЭ СО РАН разработаны средства скоростного определения дифракционных характеристик поверхности голограмм на основе мультиугловых осветителей и высокоскоростных (до 500 кадров в секунду) систем обработки оптических данных. Поле зрения у данных систем — несколько миллиметров, при мик-

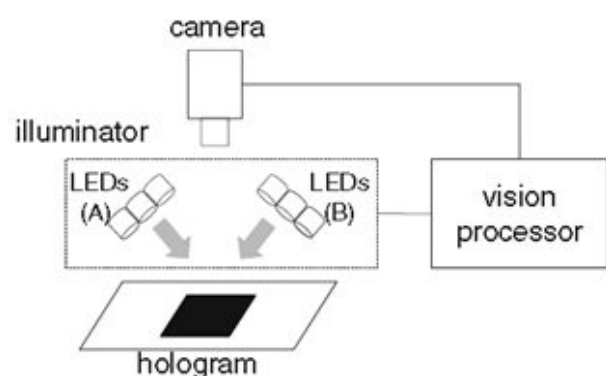


Рис. 1. Структура устройства проверки подлинности

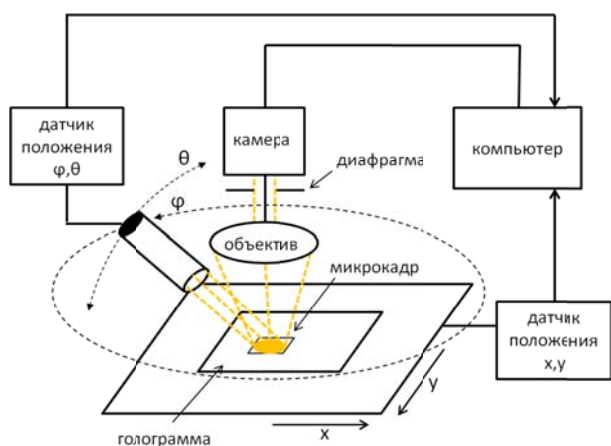


Рис. 2. Структура дифрактометра

ронном пространственном разрешении. Разработанные нами программные средства позволяют с высокой скоростью измерить параметры голопикселей в поле зрения объектива (кадр данных), получить данные об всей голограмме точно состыковывая кадры, и сравнить полученные синтезированные изображения и измеренные характеристики с проектом, по которому изготавливалась голограмма с данными полученными другими измерительными приборами.

Средства и методы измерения на основе углового дифрактометра

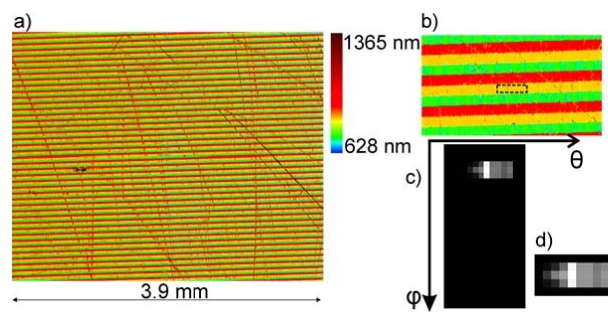
Данные о периоде дифракционных элементов и угле поворота относительно выбранной базовой линии могут быть получены с помощью сканирующих дифрактометров.

Разработанный в ИАиЭ СО РАН дифрактометр содержит: источник излучения, обеспечивающий строго коллимированное одночастотное освещение микрокадра голограммы, скоростную камеру, синхронизированную с источником излучения, автоматическую подвижку на которой установлена исследуемая голограмма и программные средства обработки полученных микрокадров (рис. 2).

Источник освещения может перемещаться вокруг исследуемой голограммы под углами $0-360^\circ$ по азимуту и $0-90^\circ$ по вертикали. Дифрагированный свет собирается объективом и, пройдя диафрагму, попадает на фотоматрицу камеры. Изображение микрозоны в координатах управляемого стола и данные об угловом положении осветителя синхронизируются с каждым кадром камеры.

Обозначим через φ азимутальный угол (угол поворота), а через θ — зенитный угол (угол наклона) между осветителем и оптической осью объектива. В результате мы получаем набор изображений (карт интенсивности), где каждому изображению I_{ij} микрозоны с координатами XY_{ij} в наборе соответствует определенная пара углов $\{\varphi_i, \theta_j\}$, $i = 1, \dots, N_\varphi$,

$j = 1, \dots, N_\theta$. Здесь N_φ и N_θ — количество всевозможных азимутальных и зенитных углов между освети-



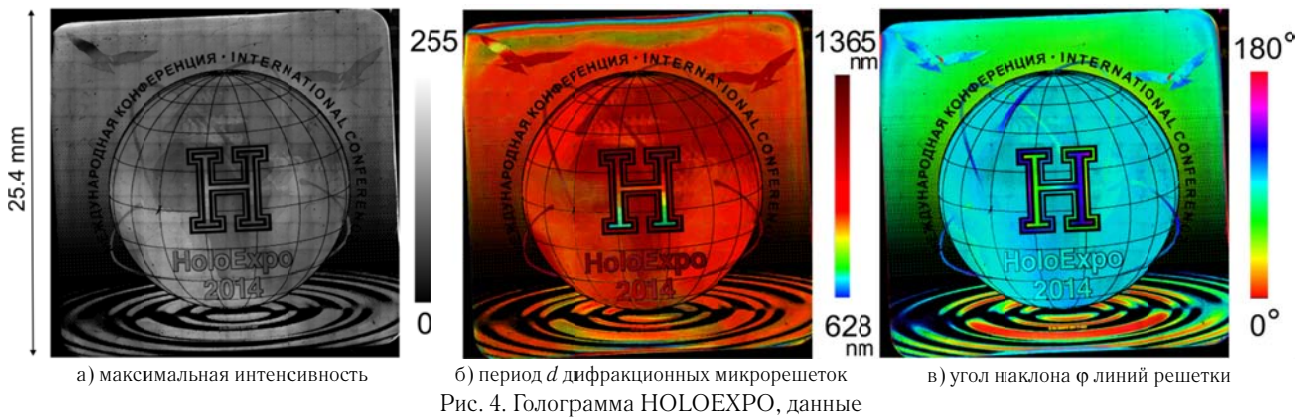
a — карта периода (цвет кодирует период решетки);
b — увеличенная зона на карте периода, черный прямоугольник показывает область, для которой вычисляется φ — θ отклик;
c — полученный φ — θ отклик, большая яркость показывает, что суммарный отклик при заданных расположениях осветителей больше; d — вырезанная φ — θ маска ($\theta = 30^\circ$, $\varphi = 30^\circ$) из φ — θ отклика

Рис. 3. Получение φ — θ масок усредненного отклика дифрактометра на тестовое изображение

телем и оптической осью объектива. В наших экспериментах типичное значение $N_\theta = 15$, $N_\varphi = 60$, таким образом, общее количество изображений: $N_\theta \times N_\varphi = 900$. По изображениям в наборе, каждой точке результирующего изображения, согласно вычислительному алгоритму (описание самих алгоритмов будет дано ниже), присваиваются значения: угол поворота φ и угол наклона θ . Пользуясь формулой дифракции на отражающей решетке, учитывая только первый порядок дифракционного максимума, период d решетки определяем как $d = \lambda / \sin(\theta)$, где λ — длина волны осветителя.

Мы использовали несколько методов для нахождения φ , θ и провели их сравнительный анализ. Первый метод основан на непосредственном поиске максимума интенсивности. Для каждого пиксела (x, y) изображения осуществляется следующая процедура. Среди всех изображений I_{ij} в наборе определяется то, в котором зафиксированное значение интенсивности максимально в данной точке (x, y) , после чего по таблице определяются соответствующие значения $\varphi(x, y)$, $\theta(x, y)$. Возможны различные модификации данного метода, например, когда $\varphi(x, y)$, $\theta(x, y)$ находятся с использованием среднего арифметического взвешенного.

Второй метод определения φ , θ основан на методе кросс-корреляции. Перед применением алгоритма осуществляется «калибровка» на тестовом объекте. В качестве тестового объекта мы использовали голограмму, состоящую из трех дифракционных решеток с одним и тем же углом поворота и различными периодами: 689 нм, 818 нм и 931 нм. Сканируя данную голограмму с помощью алгоритма поиска максимума, указанного выше, мы получаем карту периода голограммы (рис. 3a). На полученной карте мы выделяем зону, содержащую близкие значения периода решетки (рис. 3b) и затем определяем среднее значение интенсивности по данной зоне при различных углах засветки



ϕ , θ , используя исходный набор карт интенсивности. Полученная зависимость между интенсивностью и углами засветки, которую мы для удобства назовем « ϕ – θ отклик», представлена в виде изображения и показана на рис. 3с. Далее, на ϕ – θ отклике выделяется характерная зона с центром в расположении средневзвешенного значения интенсивности (рис. 3д), который мы назовем « ϕ – θ маска» и обозначим I_m . Экспериментально было установлено, что при изменении периода и угла поворота решетки меняется положение средневзвешенного значения интенсивности, однако форма ϕ – θ маски меняется незначительно. Это дает возможность использовать одну и ту же ϕ – θ маску I_m для различных углов поворота и периодов решеток.

После того как насчитана ϕ – θ маска, можно применять непосредственно метод кросс-корреляции: для каждого положения (x, y) вычисляется соответствующий ϕ – θ отклик I_r и рассчитываются значения взаимной нормализованной корреляции $R(\theta, \phi)$ изображений I_r и I_m по формуле

$$R(\theta, \phi) = \frac{\sum_{\theta', \phi'} [I_r(\theta', \phi') - \mu_r] [I_m(\theta + \theta', \phi + \phi') - \mu_m]}{\sqrt{\sum_{\theta', \phi'} [I_r(\theta', \phi') - \mu_r]^2 \sum_{\theta', \phi'} [I_m(\theta + \theta', \phi + \phi') - \mu_m]^2}}, \quad (1)$$

где μ_r и μ_m — средние значения яркостей изображений I_r и I_m , соответственно. Углы $\phi(x, y)$, $\theta(x, y)$ определяются как такие углы, на которых достигается максимум функции R .

Сравнивая работу указанных методов на тестовых объектах, мы пришли к выводу, что наилучшие результаты дает метод кросс-корреляции. Несмотря на относительно большую вычислительную сложность данного метода, было принято решение использовать на практике именно его, в силу следующих его достоинств:

- Корректнее обрабатывается ситуация, когда в изображение ϕ – θ отклика попадают вторые (третьи) дифракционные максимумы голограммы.
- Есть возможность расширить диапазон чувствительности прибора по периоду.

Для уменьшения времени работы вычислительного алгоритма были предложены следующие решения:

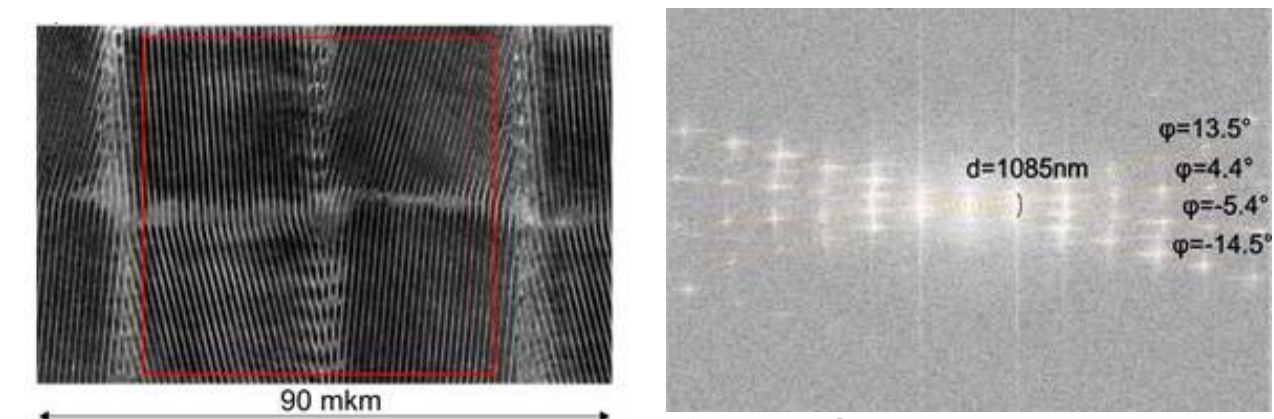
- Уменьшение зоны для расчета кросс-корреляции (использовать не весь ϕ – θ отклик, размером $N_\phi \times N_\theta$ отсчетов, а лишь его часть, в окрестности максимума по интенсивности).
- Применение порогового подхода (например, производить вычисление нормализованной взаимной корреляции только в случае, если количество точек на изображении ϕ – θ отклика с яркостью выше 0 превышает заданный порог; прекращать расчеты, если максимальное значение взаимной корреляции меньше заданного порога и т. д.).
- Распараллеливание алгоритма с помощью технологии OpenMP (в нашей системе использовалось 56 вычислительных ядер).
- Уменьшение времени обращения к памяти за счёт предварительного кэширования данных.

Комплекс разработанных решений позволяет проводить сканирование и обработку данных в реальном времени при скоростях регистрации $\approx 0,5$ – $1 \text{ мм}^2/\text{сек}$ (частота работы видеокамеры до 506 к/с). Время сканирования области $100 \times 100 \text{ мм}^2$ с дискретизацией по углам 6° при хорошей эффективности голограммы и возможности её регистрации на частоте 506 к/с — 3 часа.

На рис. 4 показан результат сканирования голограммы с помощью дифрактометра, с использованием метода кросс-корреляции. Полное изображение голограммы состоит из «сшитых» между собой микрокадров размером $\approx 1,9 \times 1,5 \text{ мм}^2$ при разрешении камеры 1280×1024 (дискретность $\approx 1,4 \text{ мкм}$).

Проверка корректности работы измерительной системы

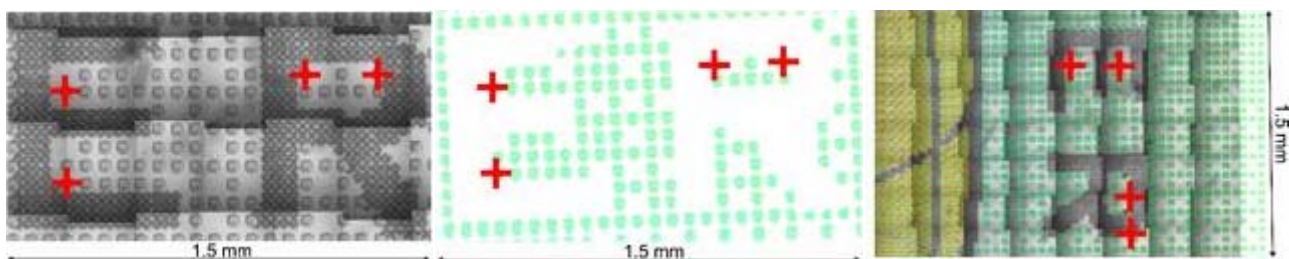
Для проверки корректности работы алгоритмов обработки данных дифрактометра ИАиЭ СО РАН использовалась измерительная система высокого разрешения на основе оптической головки конфокального микроскопа Sensofar S Neox. Для автоматического определения направления и периода голопикселей был разработан программный модуль анализа изображе-



а) Изображение интенсивности. Выделена зона, по которой строится Фурье-спектр (видны 4 решетки с разными значениями угла поворота).

б) Изображение Фурье-спектра. Каждому пику на изображении соответствует пара значений $\{\varphi, d\}$ угла поворота и периода соответственно. По критерию максимальной интенсивности определяется значение периода и направления решетки

Рис. 5. Определение периода и направление решеток по Фурье-спектру



а) данные полученные с помощью микроскопа Sensofar-50x изображение «сшитое» из нескольких снимков

б) данные, полученные с помощью дифрактометра по углу поворота голограмм

в) результат совмещения по опорным точкам (красные кресты)

Рис. 6. Совмещение данных измерений дифрактометра и с оптического конфокального микроскопа

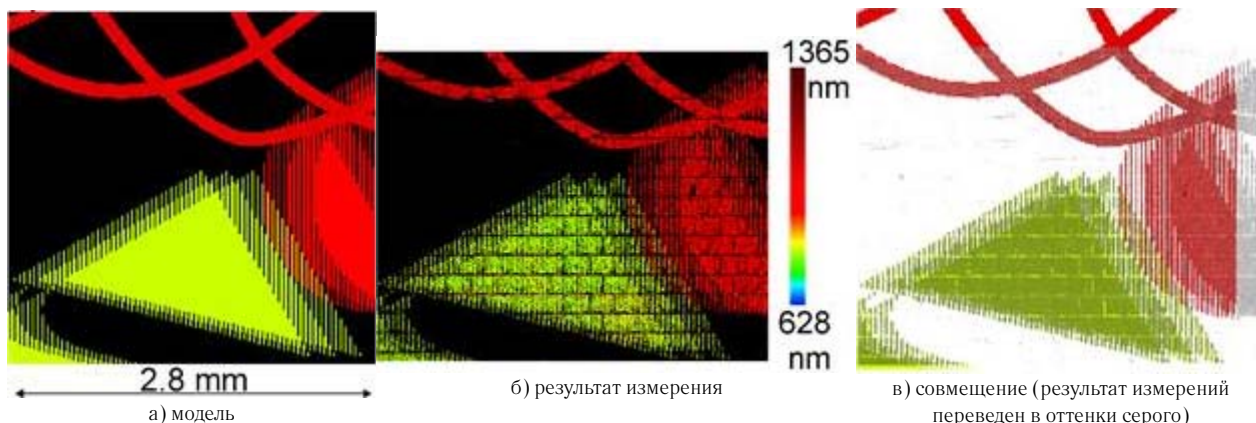


Рис. 7. Совмещение CAD-модели с результатом измерения (цветная шкала — период микрорешетки голопикселя)

ний посредством вычисления Фурье-спектра. Принцип работы данного модуля показан на рис. 5. Исследования показали, что статистическое определение периода с помощью данного подхода возможно с погрешностью менее 10 нм, угла поворота с погрешностью менее $0,5^\circ$.

На рис. 6 изображены данные, полученные с помощью микроскопа Sensofar S Neox, дифрактометра и результат совмещения по опорным точкам (за основу алгоритма совмещения взят метод, рассмотренный в работе [2]). Видно хорошее соответствие между позициями голопикселей на обоих типах данных. Различие

между этими данными по углу поворота голограммы: 1° , по периоду решетки: 15 нм.

На рис. 7 показан результат совмещения данных проекта голограммы (CAD) по периоду и результата измерения с помощью дифрактометра. Для приведенных изображений отклонение по периоду не превышает 50 нм в областях дифракционных элементов, однако присутствуют несоответствия, касающиеся геометрических характеристик объектов, что на наш взгляд связано с ошибками записывающего устройства (например, ошибками позиционирования записывающей системы).

Заключение

Разработано программное обеспечение, позволяющее автоматизировать определение и визуализацию параметров дифракционных элементов (светимость, направление, период) по данным измерений на оптических микроскопах, дифрактометрах и других системах.

Реализованы программные средства для автоматизированного сравнения данных измерений, полученных от различных приборов, а также сопоставления результатов с данными CAD-проектов.

Список источников

- [1] **Kwon, H. J.** Automated optical inspection for holograms with mixed patterns / H. J. Kwon, T. H. Park // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. — 2011. — Vol. 54. — № 1–4. — P. 215–221.
- [2] **Одионов, С. Б.** Методы и оптикоэлектронные приборы для автоматического контроля подлинности защитных голограмм.
- [3] **Kabsch, W.** A solution for the best rotation to relate two sets of vectors // Acta Crystallographica Section A: Crystal Physics, Diffraction, Theoretical and General Crystallography. — 1976. — Vol. 32. — № 5. — P. 922–923.

Software development for quality control of protective synthesized holograms according to various optical measurement systems

V. P. Bessmeltsev¹, Y. A. Kipriyanov^{1,2}

¹ Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch of the Russian Academy of Science, Novosibirsk, Russia

² Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

The task of precise quality control of holograms both during the production process and for the determination of counterfeit products has been and remains an urgent task both for production workers and forensic scientists. In this paper, we consider methods for direct measurement of the parameters of synthesized diffraction elements (synthesized holograms) by means of joint processing of optical diffractometry data and high-resolution optical microscopy, and also by comparing the data with the original CAD models.

Keywords: Optics, Holography, Diffraction optical elements.