

## РАЗРАБОТКА ОПТИЧЕСКОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ТРЕХМЕРНОГО КОНТРОЛЯ СЛОЖНЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА ОСНОВЕ НОВЫХ КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

**Квасников В.П., Ильченко В.М.**

Национальный авиационный университет, г. Киев,  
кафедра информационных технологий  
E-mail: [iids@nau.edu.ua](mailto:iids@nau.edu.ua)

### *Abstract*

*Kvasnikov V.P., Ilchenko V.N. Development of the laser measuring system of three-dimensional monitoring of difficult spatial surfaces on the basis of new informational techniques. The technical requirements to the device of 3D-control of details are resulted in work, are described essence of the offered method, structure and laser measuring system software, and also experimental results.*

**Общая постановка задачи.** Развитие новых высокоточных технологий в приборостроении вызывает необходимость повышения точности контроля деталей со сложной пространственной поверхностью. Предопределяет разработку высокоточных измерительных устройств применение оптических источников. В последнее время на основе современных информационных технологий созданы разнообразные методы синтеза, анализа, обработки, классификации и измерения трехмерных объектов [1–3].

Анализ публикаций показывает, что сегодня самыми распространенными являются два способа сканирования: оптическое сканирование с использованием ручной измерительной машины с излучающей головкой и оптическое сканирование в системе ATOS с помощью оптической установки GOM [4, 5].

**Постановка задачи исследования.** Разработать 3D-оптическую трехмерную сканирующую систему для измерения деталей сложной формы, позволяющую сократить время на разработку математической модели.

**Решение задачи.** Среди существующих бесконтактных средств 3D-контроля наиболее перспективными являются оптические на основе стереопроецирования, поточечного сканирования поверхности объекта, метод структурного освещения и т. д. В последнее время для автоматических 3D-измерений широко используется метод структурного освещения. Он основан на освещении объекта пучком света известной конфигурации, записи изображения видеокамерой и обработке информации. Форма и геометрические параметры поверхности объекта внутри измерительного объема восстанавливаются при помощи набора поперечных сечений объекта. Поскольку применение традиционного метода структурного освещения сталкивается с проблемами, касающимися формирования требуемой световой структуры, восприятия и обработки оптического изображения, используется модифицированный метод 3D-контроля. Этот метод позволяет быстро и бесконтактно выполнять автоматически 3D-измерения многих объектов.

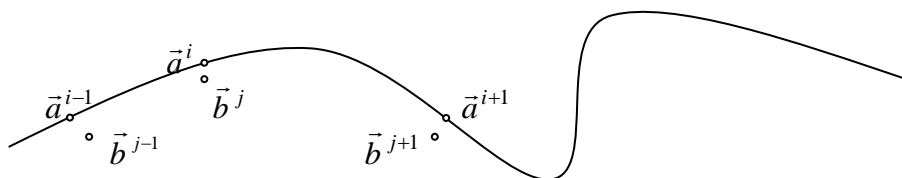


Рисунок 1 — Схема точек контроля детали

Число точек в сечении  $M$  зависит от геометрии конкретного сечения. Последовательно определяются расстояния от точки  $a^i$  до каждого из отрезков  $[b^j, b^{j+1}]$ ,  $j = 1, \dots, M - 1$ .

Точка  $d$ , соответствующая минимальному расстоянию, определяется из условия перпендикулярности вектора  $(a^i - d)$  прямой, проходящей через точки  $b^i$  и  $b^{i+1}$ . Определив расстояния от точки  $a^i$  до каждого из отрезков  $[b^j, b^{j+1}]$ , выбираем тот отрезок, расстояние до которого минимально.

Методы структурного освещения для 3D-измерений во-первых должны обеспечивать требуемую глубину фокусировки структурного светового поля. Это означает, что световое поле должно сохранять свои параметры при распространении света вдоль оси  $Z$  в измеряемом объеме. Во-вторых, камера не может одновременно записывать все части информативного объекта с одинаковым качеством. При использовании структурного освещения в виде одномерной решетки анализируемое окаймленное изображение объекта с гладкой поверхностью приводит к неопределенности идентификации полей, т.е. к значительным трудностям (а в некоторых случаях невозможности) установления связи между каждой полосой изображения и соответствующей полосой структурного светового поля. Таким образом, пространственное положение объекта и его форма не могут быть определены однозначно. Устранить этот недостаток можно путем последовательного освещения объекта световыми решетками с различными периодами и последующей обработкой всех полученных изображений объекта. Однако это связано с большими временными затратами по восстановлению 3D-объекта. Предложен модифицированный метод 3D-контроля с использованием многоточечного структурного освещения, который лишен указанных выше недостатков.

Распределение интенсивности света  $J(\xi, \eta)$  в точечном структурированном освещении представляет собой совокупность гауссовых пучков одинаковой интенсивности:

$$J(\xi, \eta) \sim A \sum_{i=-N/2}^{N/2} \sum_{\substack{j=-M/2 \\ j \neq 0}}^{M/2} \exp \left\{ -\frac{(\xi - i\Delta_\xi)^2 + (\eta - j\Delta_\eta)^2}{\sigma^2} \right\}, \quad (1)$$

где  $\xi, \eta$  — координаты поперечных сечений оптических пучков;  $N, M$  — количество гауссовых пучков вдоль  $\xi$  и  $\eta$  соответственно;  $\Delta_\xi, \Delta_\eta$  — расстояния между центрами пучков;  $\sigma$  — полуширина гауссовых пучков,  $\sigma \ll \Delta_\xi, \sigma \ll \Delta_\eta$ .

В этом случае во всем диапазоне  $D_x \approx N\Delta_\xi, D_y \approx M\Delta_\eta$  имеет место однородное освещение в опорных точках и поэтому не наблюдается заметных отличий интенсивностей падающих пучков в центре и на периферии. Благодаря малой расходимости оптических пучков обеспечивается требуемый измерительный объем по глубине  $D_z \approx D_y \approx D_x$ .

Схема экспериментальной 3D-измерительной системы представлена на рис.2.

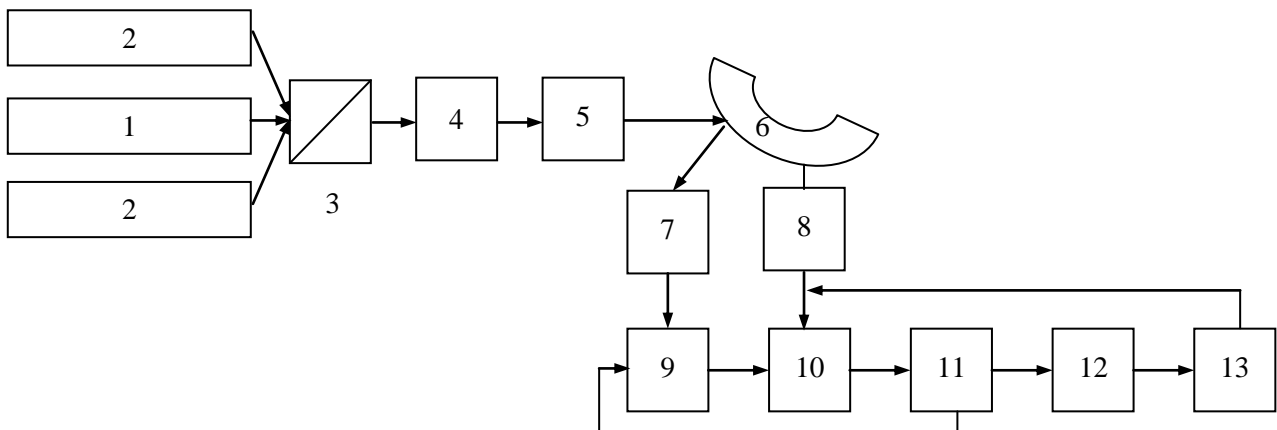


Рисунок 2 — Схема экспериментальной 3D-оптической измерительной системы

Схема содержит оптическую измерительную систему 1,2 типа LMS-100, светоделительный кубик 3, электрооптический преобразователь 4, электрооптический кристалл 5, объект измерения 6, оптические фильтры 7, фотоприемник 9, компьютер 12, аналого-цифровой преобразователь 11, цифро-аналоговый преобразователь 13.

**Функционирование 3D-оптической измерительной системы.** Программное обеспечение измерительной системы включает: основную программу; программу для анализа статистики, собранной в ходе измерения; программу для устройства сбора и обработки информации. Основная программа, написанная на языке программирования Microsoft Visual C++ версии 5.0, работает под управлением операционной системы Windows 98. Она обеспечивает отображение на экране текущего состояния процессов в удобной для оператора форме. Для взаимодействия с оператором используется оконный графический режим.

В основной программе оптической измерительной системы реализованы два режима: подготовительный и рабочий. В подготовительном режиме производятся следующие операции: тестирование основных узлов оптической измерительной системы, ввод параметров контролируемых деталей и стандартных образцов, калибровка и метрологическая поверка оптической измерительной системы.

Калибровка системы выполняется отдельно для каждого луча из структурного пучка. Рассмотрим единичный луч. Образ рассеянного излучения лежит на некоторой прямой в плоскости матрицы видеокамеры. На первом этапе находятся коэффициенты этой прямой в системе координат видеокамеры. Затем по методу наименьших квадратов находим коэффициенты  $A$  и  $B$  для получения зависимости между координатой пятна на матрице видеокамеры и 3-D координаты пятна на поверхности объекта с помощью следующей дробно-рациональной функции:

$$\Delta X = A\Delta\chi(1 + B\Delta\chi)^{-1}, \quad (2)$$

где  $\Delta\chi$  — смещение образца рассеянного излучения вдоль соответствующей прямой на камере;  $\Delta X$  — смещение пятна на поверхности контролируемого объекта вдоль луча. Зная параметры луча в пространстве, можно рассчитать 3-D координаты пятна на поверхности.

Режим измерения позволяет автоматически определить геометрические параметры объекта измерения, а также визуализировать результаты измерений по каждому из параметров и выдавать протоколы измерения и контроля в краткой или полной форме.

При измерении сложных пространственных поверхностей разработан алгоритм с использованием оптической измерительной системы, который включает в себя позиционирование измерительного наконечника; сбор и передачу от трех видеокамер в управляющий вычислительный комплекс, обработку результатов измерения, что позволяет произвести идентификацию светового пятна и восстановление формы поверхности.

В качестве поворотного стола используется координатный стол AP-400, который обеспечивает контролируемое перемещение объекта измерения в поле зрения оптико-электронного измерительного блока в направлении координат  $X$  и  $Y$ . Точность позиционирования составляет  $2 \cdot 10^{-6}$  м. Движение по двум координатам обеспечивается двумя линейными двигателями, которые управляются контролерами координат  $X$  и  $Y$ , связанными с компьютером через последовательный порт RS-232.

**Методика измерений.** Реконструкция профиля поверхности осуществляется по интенсивности дифракции света. Плоская монохроматическая волна падает нормально к поверхности, профиль которой представлен как  $z = h(x, y)$ . Искажение фронта волны сразу же после отражения поверхностью представлено в комплексной форме как

$$f(x, y) = |f(x, y)| \exp[i\theta(x, y)], \quad (3)$$

где  $\theta(x, y) = \frac{4\pi}{\lambda} h(x, y)$  — разность фаз, вносимая нерегулярностью высот на поверхности, а  $\lambda$  — длина волны излучения, падающего на поверхность.

Будем считать возмущенную волну  $f(x, y)$  объектной. Поле дифракции Фраунгофера, получаемое с помощью одиночной линзы, связано с объектной волной Фурье-преобразованием

$$F(u, v) = \iint_D f(x, y) \exp[-i2\pi(ux + vy)] dx dy, \tag{4}$$

где  $(u, v)$  — координата в частотном пространстве.

Фурье-спектр характеризуется комплексной функцией. Однако измерение интенсивности дифракции  $I(u, v) = |F(u, v)|^2$  дает только спектральную плотность мощности объектной волны. Определение объектной волны по ее спектральной плотности мощности возможно, если использовать восстановление фазы.

Качество восстановления фазы контролируют по нормированной среднеквадратичной погрешности  $\sigma_k^2$ , определяемой в области пространственных частот как [3]

$$\sigma_k^2 = \frac{\iint [ |F(u, v)| - |G_k(u, v)| ]^2 dudv}{\iint |F(u, v)|^2 dudv}. \tag{5}$$

Измерительная база, образованная несколькими датчиками, является фильтром пространственных частот. Создание алгоритмов учета передаточной функции такого фильтра позволит интерпретировать измеренный сигнал с большей достоверностью. Кроме того, имея априорную информацию о спектре пространственных частот объекта, можно использовать измерительную базу с соответствующими фильтрующими свойствами с целью выделения информации о заданных масштабах профиля объекта.

В зависимости от измеряемого профиля, свойств измерительной базы, способа измерения полученный сигнал может быть периодическим, квазипериодическим или непериодическим. Этим обусловлена необходимость исследования фильтрующих свойств базы для соответствующих сигналов. Рассмотрим особенности измерительной базы, образованной тремя датчиками, на примере контроля сложных авиационных трехмерных профилей.

Рассмотрим схему измерения, образованную тремя датчиками. Параметрами фильтра являются: размер измерительной базы; угол ее наклона  $\alpha$ , к оси визирования; расположение среднего датчика. С помощью измерительной базы размера  $b$  исследуется поверхность, профиль которой описывается функцией  $f(x, y, z)$ , где  $x, y, z$  — координаты измеряемого трехмерного объекта [4].

Выходной сигнал может быть записан в виде свертки входного сигнала  $f(x, y, z)$  с функцией импульсного отклика системы  $f(x, y, z, b, d)$  [5, 6]

$$y'(x, b) = y(x) \otimes f(x, b), \quad z'(y) = z(y) \otimes f_1(z, d) \tag{6}$$

Фурье-образы входного и выходного сигналов, согласно теореме о свертке, связаны передаточной функцией  $F(\xi)$

$$Y'(\xi) = Y(\xi)F(\xi), \quad Z'(\xi) = Z(\xi)F(\xi), \tag{7}$$

где  $F(\xi) \xleftarrow{F} f(x, y, z, b, d)$ ;  $\xi$  — пространственная частота;  $\xrightarrow{F}$  обозначает процедуру Фурье-преобразования.

Тогда используя теорему сдвига, получаем выражение для передаточной функции системы

$$F(\xi) = Y'(\xi)/Y(\xi) = 1 - \cos(\pi b \xi), \tag{8}$$

или, используя стандартные тригонометрические преобразования, получим

$$F(\xi) = 2 \sin^2(\pi b \xi / 2). \tag{9}$$

Размер измерительной базы является параметром передаточной функции фильтра. На рис. 3 изображена передаточная функция фильтра пространственных частот  $F(\xi)$ .

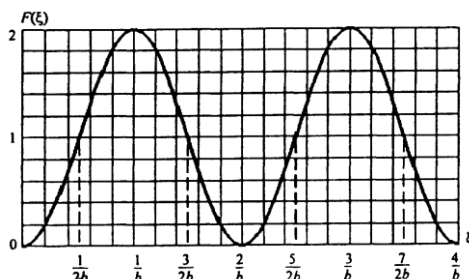


Рисунок 3 — Передаточная функция фильтра пространственных частот

Из рисунка можно заключить, что осуществляется полная фильтрация пространственных частот  $\xi = 2n/b$  ( $n = 0, 1, 2, \dots$ ) в пространственном спектре функции  $f(x, y, z)$ . Применительно к размерам это означает, что будет утеряна информация о деталях профиля, имеющих размеры  $b/2n$ . Наоборот, максимальное усиление сигнала происходит на частотах  $\xi = (2n+1)/b$  ( $n = 0, 1, 2, \dots$ ). Из условия  $F(\xi) = 1$  находим, что без искажений фильтр пропускает частоты  $\xi = (n + 0,5)/b$  ( $n = 0, 1, 2, \dots$ ).

Путем выбора размера измерительной базы возможно получение максимально достоверной информации о заданных масштабах исследуемого профиля поверхности. Кроме того, приведенная модель, позволяет разработать алгоритмы учета фильтрующих свойств базы для конкретных случаев. Так, например, при активном контроле профиля поверхности в процессе изготовления изделия размер измерительной базы следует выбирать исходя из следующих критериев. Фильтр пространственных частот должен осуществлять фильтрацию частот, связанных с нерегулярными перемещениями поверхности вследствие ее транспортировки относительно измерительной системы. Частоты же, связанные с погрешностями технологии изготовления изделия, должны таким фильтром пропускаться.

**Выводы.** Разработана методика и структурная схема 3D-оптической трехмерной сканирующей системы трехмерного контроля деталей сложной формы. Приведены технические требования к устройству 3D-контроля деталей, описаны структура оптической измерительной системы и программное обеспечение измерения деталей сложной формы.

### Литература

1. Битюцкий О. И., Вертопрахов В. В., Гущина А. А. и др. Трехмерный бесконтактный контроль геометрических параметров дистанционирующих решеток ядерных реакторов // Автометрия. 2003. — 39, № 5. — С. 4.
2. JSCTVEL nuclear fuel for power and research reactors. М.: Russian business agency, 2001.
3. Taguchi A., Miyoshi T., Takaya Y., et al. 3-D micro-profile measurement using optical inverse scattering phase method // Ann. CIPR. 2000.49, N1. — P. 423.
4. В.В. Демин, В.Г. Максимов, И.Г. Половцев Фильтрующие свойства измерительной базы в задачах профилометрии // Автометрия. — 2000. — №6. — С. 74–81.
5. Сороко Л.М. Основы голографии и когерентной оптики. — М.: Сов. радио. — 1980.
6. Макс Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях. — М.: Мир. — 1983. — Т.1.